



АНОТАЦІЯ

Боберський А.І. Оптимізація системи електропостачання Товариства з обмеженою відповідальністю «Вінницький інструментальний завод». Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітня програма – «Електротехнічні системи електроспоживання». – Вінниця, ВНТУ, 2021 – 89 с.

Іл.: 17 .

Табл.: 19 .

Бібліогр.: 33 .

Розрахунками обґрунтована оптимізація системи електропостачання інструментального заводу шляхом вибору оптимальних потужності трансформаторів, перерізів ліній 10кВ та потужностей батарей статичних конденсаторів.

Розроблено алгоритм розрахунку оптимального вектора керування БСК із врахуванням реальних напруг у вузлі її під'єднання та післядії за результатами його реалізації. Працездатність алгоритму перевірена на тестових прикладах, а його практична реалізація дозволить оптимізувати такі параметри стану системи електропостачання як втрати потужності в мережах та рівні напруг у вузлах.

Ключові слова: Оптимальне керування, математична модель, критерій ефективності, втрати потужності.

ANNOTATION

Bobersky AI Optimization of the power supply system of the Limited Liability Company "Vinnytsia Tool Plant". Master's qualification work in the specialty 141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics", educational program - "Electrical power consumption systems". - Vinnytsia, VNTU, 2021 - 89 p.

Ill .:. 17

Table:.19

Bibliogr .33:.

The calculations substantiate the optimization of the power supply system of the tool plant by selecting the optimal power of transformers, cross sections of 10 kV lines and battery capacities of static capacitors.

An algorithm for calculating the optimal control vector of BSC has been developed, taking into account the real stresses in its connection node and the aftereffects based on the results of its implementation. The efficiency of the algorithm is tested on test examples, and its practical implementation will optimize such parameters of the state of the power supply system as power losses in the networks and voltage levels in the nodes.

Keywords: Optimal control, mathematical model, efficiency criterion, power loss.

## ЗМІСТ

### ВСТУП

### РОЗДІЛ 1. ВІДОМОСТІ ПРО ТОВ «ВІННИЦЬКИЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ЗАВОД»

1.1 Історична довідка та відомості про технологічні процеси

1.2 Відомості про електричні навантаження

1.3 Висновки до розділу 1

### РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТОВ «ВІННИЦЬКИЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ЗАВОД»

2.1 Розрахунок електричних навантажень підприємства

2.2 Розрахування оптимальної потужності трансформаторної підстанції

2.3 Розрахунок активних втрат потужності в трансформаторах ТП

2.4 Розрахунок оптимального перерізу кабельних ліній для живлення підприємства

2.5 Розрахунок координат оптимального місця розташування ТП підприємства

2.6 Оптимальна компенсація реактивної потужності на ТОВ «Вінницький інструментальний завод»

2.7 Висновки до розділу 2

### РОЗДІЛ 3. ВРАХУВАННЯ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ПРИ ОПТИМАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ БСК, ЩО ВСТАНОВЛЕНІ НА ПІДПРИЄМСТВІ

3.1 Залежність потужності БСК від напруги у вузлі їх під'єднання

3.2 Управління КРП в промислових мережах 0,4 кВ при нехтуванні відхиленням напруги у вузлі їх під'єднання

3.2.1 Математична модель прийняття рішення та її аналіз

3.2 Управління КРП в промислових мережах 0,4 кВ при нехтуванні відхиленням напруги у вузлі їх під'єднання

3.2.1 Математична модель прийняття рішення та її аналіз

3.2.2 Розрахунок тестової задачі. Приклад 3.1

3.3 Математична модель, що враховує фактичний рівень напруги на затискачах БСК і алгоритм її аналізу

3.3.1 Складові взаємного впливу реактивної потужності та напруги

3.3.2 Математична модель, що враховує реальну потужність БСК та алгоритм її аналізу

3.3.3 Розрахунок тестової задачі. Приклад 3.2

3.4 Висновки до розділу 3

## РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

4.1 Розрахунок чисельності обслуговуючого та ремонтного персоналу

4.2 Розрахунок витрат по заробітній платі

4.3 Розрахунок витрат підприємства на матеріали, що потрібні на всі види ремонтів та технічне обслуговування електрообладнання та електромереж

4.4 Визначення амортизаційних відрахувань та інших витрат

4.5 Розрахунок плати за електроенергію

4.6 Собівартість електроенергії

4.7 Висновки до розділу 4

## РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкта

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

5.2.2 Склад повітря робочої зони

5.2.3 Виробниче освітлення

5.2.4 Виробничий шум

5.2.5 Виробничі вібрації

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

5.4 Висновки до розділу 5

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

### ДОДАТКИ

Додаток А. Технічне завдання до магістерської кваліфікаційної роботи

Додаток Б. Вихідні дані для виконання магістерської випускної роботи

Додаток В. Демонстраційний матеріал до МКР

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Систему електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» можна оцінити як таку, що потребує модернізації у відповідності до сучасних умов виробництва, що склались на підприємстві, перспектив розширення виробництва та рівням розвитку проектних технологій і досконалості сучасної електротехнічної продукції.

Тому робота, в якій розробляться оптимальна система електропостачання та роботи з оптимізації параметрів її стану (моделювання задач керування батареями статичних конденсаторів (БСК) із врахуванням реальних напруг) для умов ТОВ «Вінницький інструментальний завод», слід вважати актуальною.

*Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.*

Робота виконана на факультеті електроенергетики та електромеханіки ВНТУ у рамках наукових досліджень, які проводяться на кафедрі ЕСЕЕМ.

*Мета і завдання дослідження.* Метою роботи є оптимізація системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» та деяких параметрів її стану шляхом використання сучасних математичних методів оптимізації та інформаційних технологій для розрахунку оптимальних рішень, які стосуються оптимальної потужності трансформаторних підстанцій, оптимальних перерізів живильних та розподільних ліній підприємства, та розрахувань оптимальних потужностей конденсаторних установок із врахуванням перспективи розвитку виробництва, що дасть можливість скоротити долю енерговитрат в собівартості продукції підприємства.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі технічні задачі:

- виконати автоматизовані розрахунки оптимальних потужностей трансформаторів цехових підстанцій;
- здійснити автоматизовані розрахунки оптимальних перерізів ліній електропередач заводських мереж;
- розрахувати оптимальні потужності батарей статичних конденсаторів;

– розробити методику розрахунку оптимальних керуючих рішень з вибору секцій БСК для їх увімкнення, яка враховує дійсні значення напруг.

*Об'єкт дослідження* – система електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод».

*Предмет дослідження* – елементи схеми та електричні режими в системі електропостачання.

*Наукова новизна одержаних результатів.* Підвищена ефективність системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» шляхом оптимізації потужностей трансформаторів цехових ТП, перерізів кабельних ліній та місця установки трансформаторних підстанцій, а також оптимізація одного із параметрів її стану.

*Практичне значення одержаних результатів* полягає в тому, що реалізація отриманих рішень дозволить підвищити техніко-економічну ефективність системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод».

*Достовірність теоретичних положень* магістерської кваліфікаційної роботи підтверджується строгістю постановки задач, коректним застосуванням сучасних математичних методів.

*Особистий внесок здобувача.* Усі наукові положення та результати магістерської кваліфікаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором одноособово.

*Апробація результатів магістерської випускної роботи.* Викладені в роботі результати доповідались на XLIX Науково-технічній конференції факультету електроенергетики та електромеханіки (2020).

*Публікації:* А.І. Боберський, Л.Б. Терешкевич Компенсація реактивної потужності та симетрування електричних режимів в системах електропостачання // XLIX Науково-технічна конференція факультету електроенергетики та електромеханіки (2020) Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2020/paper/view/10000/8381>

*Обсяг і структура магістерської випускної роботи.* Робота складається із



вступу, 5 розділів, списку використаних джерел і додатків, загальний обсяг роботи 87 сторінок, з яких основний зміст викладений на 67 сторінках друкованого тексту, містить 17 рисунків, 19 таблиць, список використаних джерел із 33 найменувань.

## РОЗДІЛ 1.

### ВІДОМОСТІ ПРО ТОВ «ВІННИЦЬКИЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ЗАВОД»

#### 1.1 Історична довідка та відомості про технологічні процеси

Вінницький інструментальний завод розпочав роботу в 1946 році як державне підприємство. В період 1958-67 роки підприємство докорінно реконструйовано та оснащено найновішими технологіями. По завершенню реконструкції обсяг виробництва продукції збільшився проти 1965 у 3,8 рази. На заводі впроваджено найновіші технологічні процеси: шліфування стружкових канавок металорізального інструменту, електрохімічне клеймування тощо. Запроваджено технологічне обладнання для термічної обробки інструменту, автоматизовано процеси консервації та упакування готової продукції.

Підприємство ТОВ "Вінницький інструментальний завод" зареєстровано 15.01.2013 за юридичною адресою 21011, Вінницька обл., місто Вінниця, вулиця Ватутіна, будинок 25-А. Розмір статутного капіталу складає 10 000,00 грн.

Підприємство спеціалізується на випуску метало-різальних інструментів. В переліку основних видів продукції: метало-різальний інструмент для машинобудування – 60,7% різноманітна товарна продукція – 16%. Товари народного споживання – 23,3%.

## 1.2 Відомості про електричні навантаження

Дані про електроспоживачів цехів підприємства наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Назва основних виробничих об'єктів інструментального заводу

№	Найменування цехів та дільниць	Рн, кВт
1	Цех №4 (ковальсько-штампувальний цех)	260
2	Цех №5 (дрібно свердлильний цех розгорток)	150
3	Дільниця №3 (термічний цех)	400
4	Дільниця №1	200
5	Дільниця №11	200
6	Заводоуправління	60
7	Цехи перспективного розширення підприємства	240
8	Склад №1	10
9	Склад №2	10
10	Побутове приміщення	10
11	Субабоненти	500

Генплан інструментального заводу наведений на рис. 1.1.

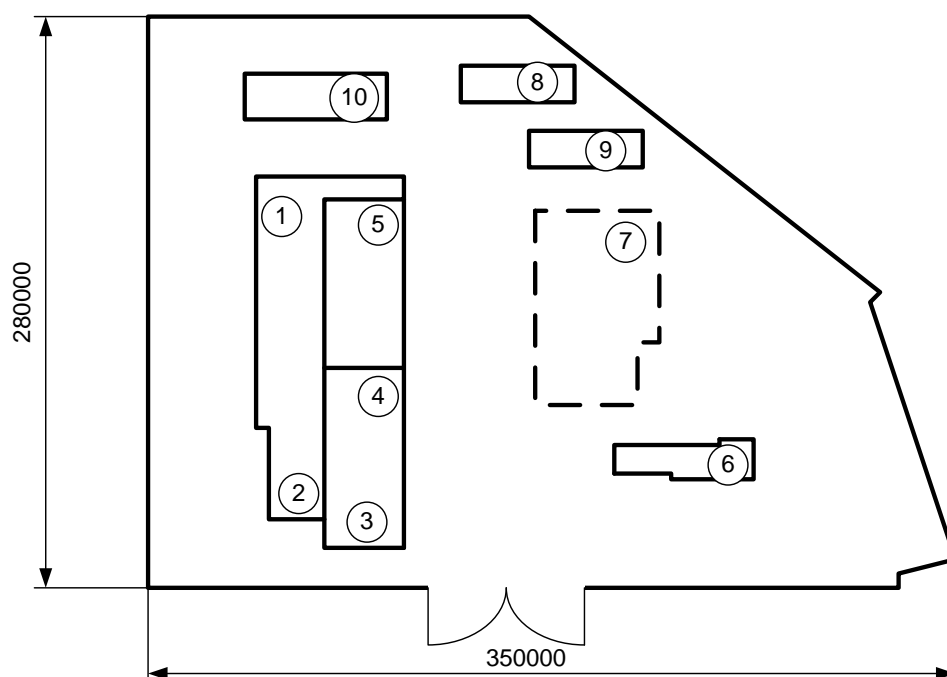


Рисунок 1.1 – Генплан ТОВ «Вінницький інструментальний завод»

За надійністю електропостачання підприємство відносяться до споживачів II категорії. Технологічне обладнання підприємства працює на електричній енергії напругою 380В промислової частоти 50 Гц.

Можливі джерела живлення:

Живлення підприємства може здійснюватись від районної трансформаторної підстанції 110/10кВ «Східна». На підстанції "Східна" встановлено два трансформатора типу ТРДН-40000Ун/Д/Д-11-11. Підстанція знаходиться на віддалі 0,65 км. Енергопостачальна компанія визначає для підприємства значення вхідної реактивної потужності – 100 квар.

### 1.3 Висновки до розділу 1

1. Система електропостачання, що експлуатується на підприємстві, не відповідає електричним навантаженням, які суттєво змінилися за останні 30 років в результаті модернізації виробництва. Крім того, в близькій перспективі буде проведено розширення виробництва шляхом будівництва нового корпусу та розширення номенклатури продукції, що виробляється.

2. На підприємстві експлуатується морально та фізично застаріле електрообладнання, що негативно позначається на техніко-економічних показниках роботи системи електропостачання підприємства, а в кінцевому підсумку на собівартості продукції.

## РОЗДІЛ 2.

### ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТОВ «ВІННИЦЬКИЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ЗАВОД»

#### 2.1 Розрахунок електричних навантажень підприємства

Розрахунки системи електропостачання (вибір електрообладнання та перерізів провідників), що проводяться як інженерним, так автоматизованим методами, можна виконати у разі якщо визначені розрахункові потужності всіх об'єктів та підприємства в цілому.

Виконаємо автоматизований розрахунок навантажень по всім виробничим об'єктам ТОВ «Вінницький інструментальний завод», а також для всього підприємства. Для цього скористаємось методом коефіцієнта попиту, що використовується провідними проектними організаціями для розрахунку освітлювального та силового навантаження саме промислових об'єктів [1, 3].

Середні та розрахункові навантаження за методом коефіцієнта попиту визначаються так:

– активне освітлювальне розрахункове навантаження  $i$ -того цеху розраховується за формулою:

$$P_{poi} = K_{poi} \cdot F_i \cdot P_{питi} \cdot K_{праi}, \quad (2.1)$$

де  $K_{poi}$  – коефіцієнт попиту освітлювального навантаження для  $i$ -го виробничого об'єкту;

$P_{питi}$  – питома густина освітлювального навантаження для  $i$ -того виробничого об'єкту, кВт/м<sup>2</sup>;

$F_i$  – площа  $i$ -того виробничого об'єкту, м<sup>2</sup>;

$K_{праi}$  – коефіцієнт втрат в пуско-регулюючій апаратурі  $i$ -того виробничого об'єкту;

– реактивне освітлювальне розрахункове навантаження  $i$ -того виробничого об'єкту розраховується за формулою:

$$Q_{poi} = F_i \cdot K_{noi} \cdot P_{номи} \cdot K_{праi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{oi}, \quad (2.2)$$

де  $\operatorname{tg} \varphi_{oi}$  – коефіцієнт реактивної потужності освітлення і-того виробничого об'єкту.

– активне середнє силове навантаження і-того виробничого об'єкту розраховується за формулою:

$$P_{ci} = K_{vi} \cdot P_{номи} + P_{poi}, \quad (2.3)$$

де  $P_{номи}$  – номінальна потужність і-того виробничого об'єкту, кВт.

$K_{vi}$  – коефіцієнт використання для і-того виробничого об'єкту;

– реактивне середнє силове навантаження і-того виробничого об'єкту розраховується за формулою:

$$Q_{ci} = P_{номи} \cdot K_{vi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + Q_{poi}, \quad (2.4)$$

де  $\operatorname{tg} \varphi_i$  – коефіцієнт реактивної потужності і-того виробничого об'єкту.

– повне середнє навантаження і-того виробничого об'єкту розраховується за формулою:

$$S_{ci} = \sqrt{P_{ci}^2 + Q_{ci}^2}. \quad (2.5)$$

Розрахункове активне навантаження будь-якого і-того виробничого об'єкту.

$$P_{pi} = P_{ni} \cdot K_{ni} + P_{poi}, \quad (2.6)$$

де  $K_{ni}$  – коефіцієнт попиту і-того цеху.

Розрахункове реактивне навантаження і-того виробничого об'єкту:

$$Q_{pi} = P_{ni} \cdot K_{ni} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i + Q_{poi}. \quad (2.7)$$

Розрахункове повне навантаження і-того виробничого об'єкту:

$$S_{pi} = \sqrt{P_{pi}^2 + Q_{pi}^2}. \quad (2.8)$$

Розрахунковий струм і-того виробничого об'єкту:

$$I_{pi} = \frac{S_{pi}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (2.9)$$

де  $U_{ном}$  – номінальна напруга, кВ.

Навантаження всіх цехів формується із навантаження силового та освітлювального, для подальших розрахунків розрахуємо середні та розрахункові навантаження цехів та підприємства в цілому:

$$P_{po\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_{poi} ; \quad (2.10)$$

$$Q_{po\Sigma} = \sum_{i=1}^N Q_{poi} ; \quad (2.11)$$

$$P_{c\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_{ci} ; \quad (2.12)$$

$$Q_{c\Sigma} = \sum_{i=1}^N Q_{ci} ; \quad (2.13)$$

$$P_{p\Sigma} = K_o \cdot \sum_{i=1}^N (P_{номи} \cdot K_{ni}) + P_{po\Sigma} ; \quad (2.14)$$

$$Q_{p\Sigma} = K_o \cdot \sum_{i=1}^N (P_{номи} \cdot K_{ni} \cdot tg\varphi_i) + Q_{po\Sigma} , \quad (2.15)$$

де  $K_o$  – коефіцієнт одночасності [3], (розраховується, як відношення розрахункової потужності на шинах 10 кВ до суми розрахункових потужностей споживачів, які підключені до шин 10 кВ цехової підстанції),  $K_o$  в розрахунках, що виконуються, приймемо 0,95;

$N$  – кількість виробничих підрозділів.

Повне сумарне навантаження підприємства:

$$S_{c\Sigma} = \sqrt{P_{c\Sigma}^2 + Q_{c\Sigma}^2} ; \quad (2.16)$$

$$S_{p\Sigma} = \sqrt{P_{p\Sigma}^2 + Q_{p\Sigma}^2} . \quad (2.17)$$

Сумарний струм:

$$I_{p\Sigma} = \frac{S_{p\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} . \quad (2.18)$$

Питома густина навантаження  $i$ -того виробничого об'єкту:

$$\rho_i = \frac{S_{pi}}{F_i} . \quad (2.19)$$

Питома густина навантаження по підприємству в цілому:

$$\rho_{\Sigma} = \frac{S_{p\Sigma}}{F_{\Sigma}}. \quad (2.20)$$

Результати автоматизованого розрахунку навантажень ТОВ «Вінницький інструментальний завод» та всіх його виробничих підрозділів зведені в електронній таблиці (рис. 2.1).

## 2.2 Розрахування оптимальної потужності трансформаторної підстанції

Розрахунок виконаємо, використовуючи методи математичного програмування. За критерій ефективності приймемо річні приведені затрати на підстанцію.

Оскільки підприємство відноситься до другої категорії за надійністю електропостачання, тому виконаємо вибір двотрансформаторної підстанції [4], що живить ТОВ «Вінницький інструментальний завод».

Оптимальну потужність трансформаторної підстанції, що живить підприємство, визначимо за дискретною математичною моделлю. Керованою змінною в математичній моделі є потужність трансформаторів –  $S_T$ , яка вибирається із множини стандартних.

$$\left\{ \begin{array}{l} 3(S_T) = (E_e + E_a) \cdot k_{ТП}(S_T, k_T) + \left[ \Delta P_{xx}(S_T) \cdot k_T + \Delta P_{кз}(S_T) \cdot \frac{S_{ТП}^2}{S_T^2 \cdot k_T} \right] \cdot t \cdot \tau \rightarrow \min_{S_T \in S_{СТ}} \\ S_T \cdot k_T \cdot k_H \geq S_{ТПсм} \\ k_T > 1 \Rightarrow S_T \cdot k_{па} \geq S_{ТПр} \cdot k_{нпа} \\ S_T \in S_{СТ} \end{array} \right. \quad (2.21)$$

де  $S_{СТ}$  – множина стандартних потужностей трансформаторів;

$E_e$  – коефіцієнт ефективності капіталовкладень;

$E_a$  – коефіцієнт відрахувань на амортизацію;



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
						U= 0,38				Ko= 0,95												
№	Найменування цехів	Дані сили					Світло							Середні навантаження			Розрах. Нав.				ρ кВА/м <sup>2</sup>	
		Рн кВт	cos	tg	Кп	Кв	Площа м <sup>2</sup>	Ксо	Рпит кВт/м <sup>2</sup>	Кпра	tgφ0	Qмо квар	Рро кВт	Рс кВт	Qс квар	Sc кВА	Рр кВт	Qр квар	Sp кВА	Ip, А		
1	Цех №4 (ковально-штампувальний цех)	100	0,7	1,02	0,6	0,2	400,00	0,80	0,016	1,20	0,48	2,95	6,14	26,14	23,35	35,06	66,14	64,16	92,15	140,01	0,2304	
2	Цех №5 (дрібно свердильний цех розгортки)	120	0,65	1,17	0,8	0,4	370,00	0,85	0,015	1,10	0,48	2,49	5,19	53,19	58,61	79,15	101,19	114,73	152,98	232,42	0,4134	
3	Дільниця №3 (термічний цех)	120	0,8	0,75	0,75	0,5	200,00	0,80	0,016	1,10	0,48	1,35	2,82	62,82	46,35	78,07	92,82	68,85	115,57	175,58	0,5778	
4	Дільниця №1	100	0,9	0,48	0,8	0,35	200,00	0,85	0,015	1,10	0,48	1,35	2,81	37,81	18,30	42,00	82,81	40,09	92,00	139,78	0,46	
5	Дільниця №11	80	0,8	0,75	0,8	0,55	320,00	0,85	0,017	1,10	0,48	2,44	5,09	49,09	35,44	60,54	69,09	50,44	85,54	129,97	0,2673	
6	Заводоуправління	60	0,85	0,62	0,65	0,5	200,00	0,70	0,018	1,10	0,48	1,33	2,77	32,77	19,92	38,35	41,77	25,50	48,94	74,36	0,2447	
7	Цехи перспективного розширення	240	0,8	0,75	0,7	0,45	520,00	0,90	0,017	1,10	0,48	4,20	8,75	116,75	85,20	144,53	176,75	130,20	219,53	333,54	0,4222	
8	Склад №1	10	0,8	0,75	0,7	0,7	200,00	0,80	0,019	1,10	0,48	1,61	3,34	10,34	6,86	12,41	10,34	6,86	12,41	18,85	0,062	
9	Склад №2	10	0,7	1,02	0,85	0,3	200,00	0,85	0,017	1,10	0,48	1,53	3,18	6,18	4,59	7,70	11,68	10,20	15,50	23,56	0,0775	
10	Побутове приміщення	10	0,85	0,62	0,9	0,55	250,00	0,85	0,014	1,10	0,48	1,57	3,27	8,77	4,98	10,09	12,27	7,15	14,20	21,58	0,0568	
11	Субабоненти	450	0,8	0,75	0,7	0,45	500,00	0,90	0,019	1,10	0,48	4,51	9,41	211,91	156,39	263,37	324,41	240,76	403,99	613,80	0,808	
Всього по підприємству		1300				0,43	3363,00					25,35	52,81	615,81	460,01	768,66	942,49	722,28	1187,43	1804,11	0,3531	

Рисунок 2.1 – Розрахунок навантажень ТОВ «Вінницький інструментальний завод»

$S_{ТПр}$  – розрахункова потужність трансформаторної підстанції;  
 $S_{ТПсм}$  – середня потужність трансформаторної підстанції;  
 $k_{ТП}(S_T, k_T)$  – капіталовкладення в ТП, що залежить від кількості вибраних трансформаторів та їх потужностей.

В математичній моделі за критерій ефективності прийнято річні приведені затрати. Вибір оптимальної потужності трансформаторів здійснюється із множини допустимих за навантаженням значень, яка формується із стандартних потужностей трансформаторів  $S_T$ .

За результатами розрахунків на підприємстві необхідно встановити двотрансформаторну підстанцію з трансформаторами потужністю 1600 кВА.

### 2.3 Розрахунок активних втрат потужності в трансформаторах ТП

При трансформації електричної енергії мають місце втрати потужності в трансформаторах. Вибір перерізу лінії живлення необхідно виконувати із врахуванням цих втрат, оскільки по зазначених лініям передається як потужність електроприймачів, так і потужність, що втрачається в трансформаторах. Розрахуємо втрати потужності в трансформаторах. Кінцеві результати такого розрахунку представлені на рис. 2.6.

Втрати активної потужності [5]:

$$\Delta P_{TP} = n \cdot \Delta P_{xx} + \frac{1}{n} \cdot \Delta P_{кз} \cdot \left( \frac{S_p}{S_{ном.тр}} \right)^2, \quad (2.22)$$

де  $n$  - кількість трансформаторів в ТП;

$\Delta P_{TP}$  - втрати активної потужності в тарнсформаторах, кВт;

$\Delta P_{xx}$  - потужність холостого ходу трансформатора, кВт;

$\Delta P_{кз}$  - втрати короткого замикання трансформатора, кВт;

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Вибір оптимальної потужності ЦТП за мінімум затрат														
2	Економічні характеристики														
3	Питома вартість втрат, грн/кВт										Bo =	560,895			
4	Коефіцієнт ефективності капітовкладень										Ee =	0,1			
5	Коефіцієнт відрахувань на амортизацію										Ea =	0,036			
6	ТП1														
7	Дані нормального режиму														
8	Розрахункова потужність ТП, кВА										Sp=	1804,11			
9	Середня потужність ТП, кВА										Sc=	768,66			
10	Кількість трансформаторів										кт=	2			
11	Допустимий коефіцієнт навантаження в н. режимі										Kn=	1			
12	Дані післяварійного режиму														
13	Допустимий коефіцієнт навантаження в післяварійному режимі										Kпа =	1,3			
14	Доля навантаження в післяварійному режимі										Knпа =	0,8			
15															
16	*	St кВА	ΔPкз кВт	ΔPxx кВт	Ктп, тис.грн.	Е*К, тис.грн.	ΔPзм кВт	ΔPпс кВт	ΔP кВт	Вв, тис.грн.	З, тис.грн	Х	кт*кн*St >=Sc	кпа*St>= кнпа*Sp	*
17		63	1,28	0,24	95,78	13,02608	524,8376	0,48	525,3176	294,648		-	-	-	
18		100	1,97	0,33	101,71	13,83256	320,5991	0,66	321,2591	180,1926		-	-	-	
19		160	3,1	0,51	109,45	14,8852	197,0687	1,02	198,0887	111,107		-	-	-	
20		250	4,2	0,74	119,46	16,24656	109,3617	1,48	110,8417	62,17056		-	-	-	
21		400	5,9	0,95	143,38	19,49968	60,01061	1,9	61,91061	34,72535		-	+	-	
22		630	8,5	1,31	159,53	21,69608	34,85249	2,62	37,47249	21,01813		-	+	-	
23		1000	10,5	2,1	188,23	25,59928	17,08777	4,2	21,28777	11,9402		-	+	-	
24	V	1600	18	2,8	234	31,824	11,4427	5,6	17,0427	9,559166	41,38317	1600	+	+	V
25		2500	23,5	3,85	267,73	36,41128	6,119048	7,7	13,81905	7,751035	44,16232	2500	+	+	
26															
27	Мінімальні затрати, грн										Zmin=	41,38317			
28	Оптимальна потужність трансформатора, кВА										St*=	1600			
29	Оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора										кз*=	0,563784			

Рисунок 2.2 – Вибір оптимальної потужності ТП

$S_{ном.тр}$  - номінальна потужність трансформатора ТП, кВА;

$S_p$  - повне розрахункове навантаження на ТП, кВА.

Втрати реактивної потужності [5]:

$$\Delta Q_{ТР} = n \cdot \frac{I_{xx}}{100} \cdot S_{ном.тр} + \frac{1}{n} \cdot \frac{U_{кз}}{100} \cdot \frac{S_p^2}{S_{ном.тр}}, \quad (2.23)$$

де  $\Delta Q_{ТР}$  - втрати реактивної потужності в трансформаторах, квар;

$I_{xx}$  - струм холостого ходу трансформатора, А;

$U_{кз}$  - напруга короткого замикання, % від номінальної.

F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
$\Delta P_{кз},$ кВт	$I_{xx},$ %	$U_{кз},$ %	$P_p,$ кВт	$Q_p,$ квар	$S_p,$ кВА	$\Delta P_{тр},$ кВт	$\Delta Q_{тр},$ квар	$\Delta S_{тр},$ кВА	$P,$ кВт	$Q,$ квар
18	1,3	5,5	942,49	722,28	1823,98	17,29614	98,78115	100,284	959,7861	821,0611

Рисунок 2.6 – Результати розрахунку втрат потужності в трансформаторах ТП

#### 2.4 Розрахунок оптимального перерізу кабельних ліній для живлення підприємства

Підприємства, які відносяться до другої категорії за надійністю електропостачання повинні житися двома лініями електропередач. ТОВ «Вінницький інструментальний завод» знаходиться в межах міста і тому його живлення від районної трансформаторної підстанції 110/10 кВ «Східна» виконаємо двома кабельними лініями.

Задачу вибору перерізу кабельних ліній можна вирішувати як оптимізаційну, оскільки існує множина можливих технічних рішень. Необхідні розрахунки виконаємо за допомогою Excel таблиць у відповідності до оптимізаційної моделі. Дана математична модель враховує всі вимоги нормативних документів.

$$\left\{ \begin{array}{l} Z(x) = \left[ (E_e + E_a) \cdot K_0(x) + 3 \cdot I_l^2 \cdot r_0(x) \cdot t \cdot \tau \right] \cdot L \cdot k_l \rightarrow \min_{x \in X_{cm}} \\ x \geq x_{\partial on} \equiv k_{\partial on} \cdot I_{\partial on}(x) \geq I_l \\ x \geq x_{\partial on} \equiv k_{na} \cdot I_{\partial on}(x) \geq I_l \cdot k_l \cdot k_{nna} \\ \Delta U_n(x) \leq \Delta U_{\partial on} \\ \Delta U_{na}(x) \leq \Delta U_{\partial on} \\ x \geq x_{k3} = \frac{I_{k3} \cdot \sqrt{t_n}}{C} \\ x \in X_{cm} \end{array} \right. \quad (2.24)$$

де  $Z(X)$  - експлуатаційні витрати в кабельних лініях перерізом  $X$ ;

$k_0(x)$  – питома вартість кабельних ліній (залежить від перерізу і кількості ліній);

$B_B(x)$  - річна вартість втрат електричної енергії в кабельних лініях, переріз яких  $X$ ;

$I_l$  – струм лінії, що відповідає розрахунковій потужності;

$I_{\partial on}(x)$  – допустимий струм для відповідного перерізу згідно ПУЕ [3];

$\Delta U_n(x)$  – втрати напруги в лінії перерізом  $X$ , що відповідають нормальному режиму роботи;

$\Delta U_{na}(x)$  – втрати напруги в лінії перерізом  $X$ , що відповідають післяаварійному режиму роботи;

$\Delta U_{\partial on}$  – допустимі втрати напруги, яким відповідають допустимі відхилення напруги [8];

$K_{\partial on}(x)$  - коефіцієнт допустимого навантаження [3];

$k_{\partial on}$  – коефіцієнт допустимого навантаження,  $k_{\partial on} = k_{\Pi} \cdot k_c$ ;

$k_{\Pi}$  – коефіцієнт прокладки,  $k_{\Pi}=1$  [3], що відповідає випадку, за умови живлення двокабельною лінією коли кабелі прокладені в різних траншеях (по одному кабелю в траншеї);

$k_c$  – коефіцієнт середовища;

$k_{na}$  – максимальний допустимий коефіцієнт навантаження кабельних ліній при їх прокладці у землі в післяаварійному режимі, приймаємо  $k_{na} - 1,25$  для найважчих умов перевантаження і при його тривалості 6 год. і  $K_3 = 0,6$ .

$x_{кз}$  – мінімальний переріз лінії за умовою термічної дії струмів к. з.;

$t_n$  – приведений час к. з. (с)  $\approx 1,5$ с;

$I_{кз}$  – струм к. з. на початку лінії;

$C$  – тепловий коефіцієнт  $\frac{A \cdot \sqrt{c}}{мм^2}$  (згідно [6], для кабелів 10кВ з алюмінієвими жилами коефіцієнт  $C = 90$ ).

Цільова функція математичної моделі описує річні приведені затрати. Множиною можливих рішень є множина всіх стандартних перерізів кабелів 10 кВ.

Керованою змінною –  $X$  є переріз кабелів ( $мм^2$ ). Її числове значення треба розрахувати

Математична модель (2.24) забезпечує мінімум річних приведених витрат, а перерізи кабельних ліній забезпечують встановлені вимоги до їх перерізів в нормальних та післяаварійних режимах. Також математична модель контролює втрати напруги в лініях, що будуть як в нормальних, так і в післяаварійних режимах. Допустимість термічної дії струмів короткого замикання забезпечується відповідним обмеженням.

Розрахунок оптимального перерізу кабельних ліній напругою 10кВ проводимо за допомогою таблиці Excel, рис. 2.7. На рис. 2.7 також наведені результати розрахунків перерізів кабельних ліній за критерієм мінімуму річних приведених затрати в зовнішню лінію живлення.

Вибір оптимального перерізу зовнішньої живлячої КЛ																			
Економічні характеристики																			
Питома вартість втрат, грн/кВт															Bo=	560,895			
Коефіцієнт ефективності капіталовкладень															Ee=	0,1			
Коефіцієнт відрахувань на амортизацію															Ea=	0,04			
Дані нормального режиму																			
Напруга, кВ															U =	10			
Активна розрахункова потужність споживача, кВт															P =	959,7861			
Реактивна розрахункова отужність споживача, кВАр															Q =	821,0611			
Розрахунковий струм окремого кабелю, А															Ip =	34,30			
Коефіцієнт допустимого навантаження															Kдоп =	1,00			
Допустима втрата напруги в КЛ, %															dUдоп =	5			
Кількість кабелів															k =	2			
Довжина лінії, км															L =	2,5			
Дані аварійного режиму																			
Струм КЗ на початку лінії, кА															Iкз =	3,0386856			
Приведений час КЗ, с															tn =	1,5			
Тепловий коефіцієнт C, $[A \cdot c^{1/2}] / \text{мм}^2$															C =	90			
Мінімальний переріз лінії за умовою КЗ, мм <sup>2</sup>															Fкз =	41,35			
Максимально допустимий коефіцієнт навантаження в післяаварійному режимі															Kпа =	1,25			
Доля навантаження в післяаварійному режимі															Kнпа =	0,8			
Допустима втрата напруги в КЛ, %															dUпадоп =	5			
F, мм <sup>2</sup>	Ro, Ом/км	Xo, Ом/км	K0, т.грн/км	Iдоп, А	dUn, %	dUna, %	dP, кВт	K, т.грн	E*K, т.грн	Vв, т.грн	З, т.грн	X	Kдоп*Iдоп >= Ip	n*Iдоп >= Kнпа*k*	dUn <= dUдоп	dUna <= dUпадоп	F >= Fкз		
10	3,1	0,122	9,5381	65	3,84	6,15	54,71	47,69	6,68	30,68	-	-----	+	+	+	-	-		
16	1,94	0,113	13,784	75	2,44	3,91	34,24	68,92	9,65	19,20	-	-----	+	+	+	+	-		
25	1,24	0,099	19,854	90	1,59	2,54	21,88	99,27	13,90	12,27	-	-----	+	+	+	+	-		
35	0,89	0,095	25,953	115	1,17	1,86	15,71	129,77	18,17	8,81	-	-----	+	+	+	+	-		
<b>v</b> 50	0,62	0,09	36,927	140	0,84	1,34	10,94	184,64	25,85	6,14	31,99	50	+	+	+	+	+		
70	0,443	0,086	50,501	165	0,62	0,99	7,82	252,51	35,35	4,38	39,74	70	+	+	+	+	+		
95	0,326	0,083	65,451	205	0,48	0,76	5,75	327,26	45,82	3,23	49,04	95	+	+	+	+	+		
120	0,258	0,081	82,823	240	0,39	0,63	4,55	414,12	57,98	2,55	60,53	120	+	+	+	+	+		
150	0,206	0,079	102,11	275	0,33	0,53	3,64	510,55	71,48	2,04	73,52	150	+	+	+	+	+		
185	0,167	0,077	137,48	310	0,28	0,45	2,95	687,40	96,24	1,65	97,89	185	+	+	+	+	+		
Мінімальні затрати, тис.грн										Змін	31,99								
Оптимальний переріз КЛ, мм <sup>2</sup>										Хопт	50								

Рисунок 2.7 – Результати розрахунку оптимального перерізу КЛ – 10 кВ від РТП «Східна» до підприємства

## 2.5 Розрахунок координат оптимального місця розташування ТП підприємства

Місце розташування вибраної трансформаторної підстанції потребує обґрунтування, адже від цього будуть залежати довжини ліній розподільчої мережі 0,4 кВ і, як наслідок, активні втрати в них. Оскільки існують варіанти розташування ТП на плані підприємства, то таку задачу можна віднести до оптимізаційних. Місце оптимального розміщення ТП за критерієм мінімуму активних втрат прийнято називати центром електричних навантажень (ЦЕН) [2]. В проектній практиці використовується методика розрахунку ЦЕН виконується побудова картограми електричних навантажень

Картограма електричних навантажень являє собою генплан підприємства, в якому на площі окремих об'єктів у вигляді кіл наносяться їх силове та освітлювальне навантаження. Радіуси цих кіл пропорційні потужності об'єктів підприємства та визначаються за формулою [2]:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_{pi}}{\pi m}}, \quad (2.25)$$

де-  $m$  – вибраний масштаб картограми навантажень,  $\frac{\text{кВт}}{\text{мм}^2}$ ,  $m=0,1$ ;

$P_{pi}$  – розрахункова активна потужність  $i$ -го виробничого об'єкта;

$\pi = 3,14$ .

На картограмі освітлювальне навантаження зображається сектором кола, який розраховується [4]:

$$\alpha_{\text{осв } i} = \frac{P_{po} * 360}{P_{po} + P_{pi}}, \quad (2.26)$$

де  $P_{po}$  - розрахункова активна потужність освітлювального навантаження деякого виробничого об'єкта, кВт;

Вихідні дані та результати розрахунку картограми навантажень ТОВ «Вінницький інструментальний завод» наведені в таблиці 2.1.



Таблиця 2.1 – Розрахунок картограми активних навантажень

№ за плано м	Найменування об'єктів підприємства	$P_{p\Sigma}$ , кВт	$P_{po}$ , кВт	R,мм	$\alpha_{осв}$ , град
1	Цех №4 (ковальсько-штампувальний цех)	66,14	6,14	20,5	33,4
2	Цех №5 (дрібно свердлильний цех розгортки)	101,2	5,19	25,32	18,46
3	Дільниця №3 (термічний цех)	92,82	2,82	23,2	10,9
4	Дільниця №1	82,81	2,81	23	12,2
5	Дільниця №11	69,09	5,09	21	26,6
6	Заводоуправління	41,77	2,77	16,3	28,3
7	Цехи перспективного розширення підприємства	176,75	8,75	33,4	17,8
8	Склад №1	10,34	3,34	8	116,2
9	Склад №2	11,68	3,18	8,6	98
10	Побутове приміщення	12,27	3,27	8,4	96,8
11	Субабоненти	–	–	–	–

ЦЕН підприємства розраховується за формулами:

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^{10} (P_{p,i} + P_{p,o,i}) X_i}{\sum_{i=1}^{10} (P_{p,i} + P_{p,o,i})}; \quad (2.27)$$

$$Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{10} (P_{p,i} + P_{p,o,i}) Y_i}{\sum_{i=1}^{10} (P_{p,i} + P_{p,o,i})}, \quad (2.28)$$

де  $X_i, Y_i$  – координати центру навантажень  $i$ -го виробничого об'єкту.

Розрахунок ЦЕН виконано в масштабі креслення формату А4. Початок відліку суміщено з нижнім лівим кутом плану підприємства на рисунку 2.1. Результати розрахунку ЦЕН зведені до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок ЦЕН підприємства

№ за планом	Найменування об'єктів підприємства	$P_{роз}+P_{ос}$ кВт	X, мм	Y, мм	$P_{роз}*X$ , кВт*мм	$P_{роз}*Y$ , кВт*мм
1	Цех №4 (ковальсько-штампувальний цех)	66,14	24	52	1587,4	3439,3
2	Цех №5 (дрібно свердлильний цех розгортки)	101,2	24	32	2428,8	3238,4
3	Дільниця №3 (термічний цех)	92,82	37	17	3434,4	1577,9
4	Дільниця №1	82,81	37	29	3064	2401,5
5	Дільниця №11	69,09	37	52	2556,3	3592,7
6	Заводоуправління	41,77	95	22	3968,2	918,9
7	Цехи перспективного розширення підприємства	176,75	79	52	13963,3	9191
8	Склад №1	10,34	65	85	672,1	878,9
9	Склад №2	11,68	77	77	899,4	899,4
10	Побутове приміщення	12,27	27	86	331,3	1055,2
11	Субабоненти					
Всього по підприємству		664,9			32905,2	27193,2

Координати ЦЕН підприємства (оптимального місця розташування ТП, від якої живиться підприємство), визначені за наведеними формулами (27, 28), становлять:

$$X_0 = \frac{32905,2}{664,9} = 49,5 \text{ мм};$$

$$Y_0 = \frac{27193,2}{664,9} = 40,9 \text{ мм}.$$

Результати проведених розрахунків ЦЕН наведені на рис. 2.11

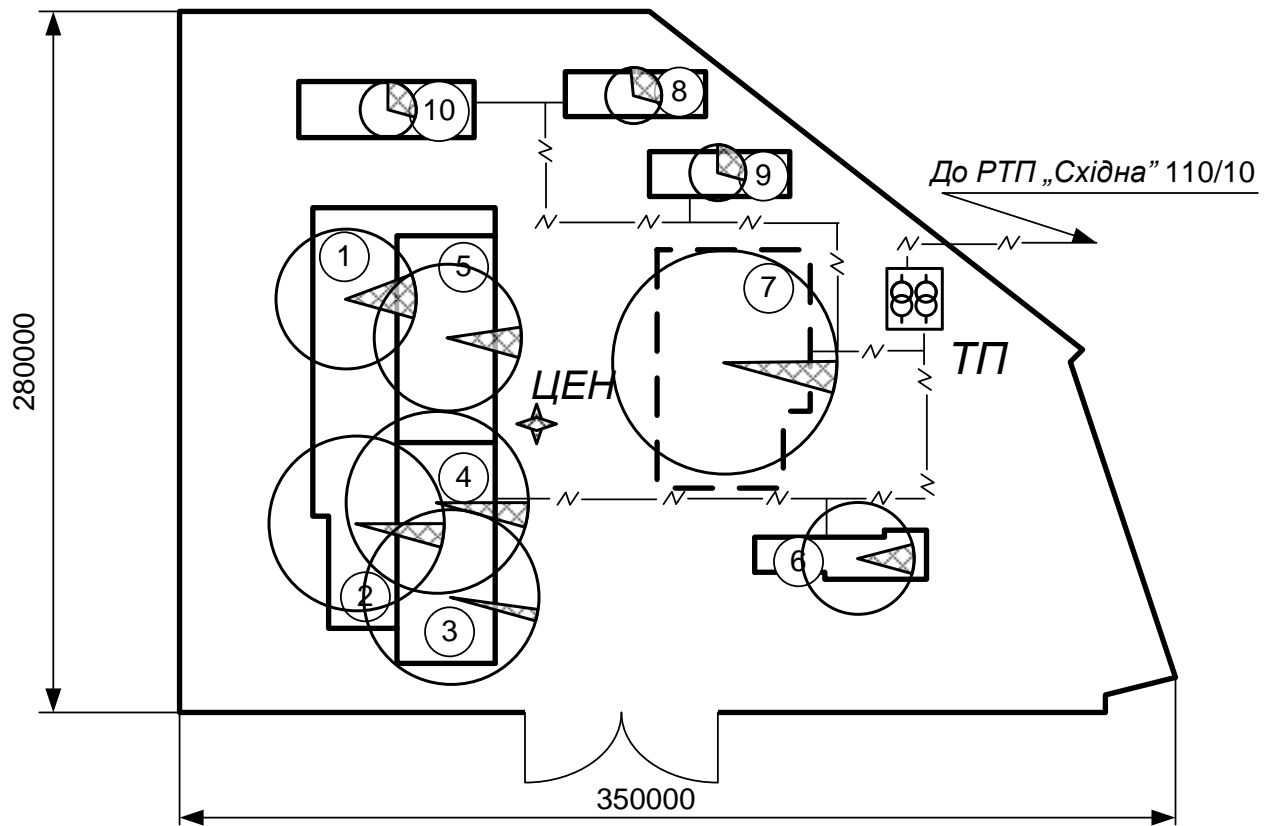


Рисунок 2.11 – ЦЕН та мережі підприємства

Установити ТП безпосередньо в ЦЕН неможливо, оскільки таке її розташування створює перешкоди для руху транспорту. Місце установки ТП показано на рис. 2.11., змістивши її в сторону джерела живлення.

## 2.6 Оптимальна компенсація реактивної потужності на ТОВ «Вінницький інструментальний завод»

Встановлення конденсаторних батарей зменшує перетоки реактивної потужності в мережах в результаті зменшується струм та активні втрати [9]. Для умов ТОВ «Вінницький інструментальний завод» установку БСК можна виконати лише в розподільному пристрої 0,4 кВ ТП. У цьому випадку

зменшення активних втрат буде відбуватися в мережі живлення 10 кВ та в трансформаторах.

Розраховуючи потужності БСК, потрібно враховувати вимоги енергопостачальної компанії щодо споживання реактивної потужності із системи. Енергопостачальною компанією встановлена така потужність для годин максимальних навантажень –  $Q_e$ ,  $Q_e = 100$  квар.

Загальна потужність БСК, що потрібно установити на підприємстві становить [1]:

$$Q_{KV} \geq Q_M - Q_e = 821,06 - 100 = 721,06 \text{ квар,}$$

де  $Q_M$  – максимальна реактивна потужність, що споживається підприємством, враховуючи втрати потужності в трансформаторах ТП.

Оскільки трансформаторна підстанція має два трансформатора, загальну потужність БСК розподілимо рівномірно між ними (при цьому вважаємо, що все навантаження підприємства також рівномірно розподілено між трансформаторами). Таким чином, до кожного трансформатора підключаються БСК по 360 квар.

Реактивна потужність по підприємству змінюється протягом доби і тому виникне потреба змінювати генеровану БСК реактивну потужність. Тому виберемо керовані БСК, які випускаються вітчизняною промисловістю.

БСК, що під'єднуються до кожної секції збірних шин комплектується ККУ-0,4-300/12-25-21УЗ потужністю 300 квар. Установка має 12 секцій керування по 25 квар.

ККУ-0,4-60/12-5-21УЗ потужністю 60 квар. Установка має по 12 секцій керування по 5 квар.

## 2.7 Висновки до розділу 2

1. В системі електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» доцільно встановити комплектну двотрансформаторну підстанцію з трансформаторами потужністю 1600 кВА.

2. Економічно доцільним є живлення підприємства двома кабельними лініями на ділянці РТП «СХІДНА» – ТП підприємства 2ААБ(3×50);

3. Для зниження втрат активної потужності в лініях живлення 10 кВ і в трансформаторах, а також для забезпечення вимог енергосистеми що до споживання реактивної потужності до кожної секції збірних шин 0,4 кВ ТП слід під'єднати такі керовані ККУ:

– ККУ-0,4-300/12-25-21УЗ потужністю 300 квар, яка має 12 секцій керування по 25 квар.

– ККУ-0,4-60/12-5-21УЗ потужністю 60 квар, яка має 12 секцій керування по 5 квар.



РОЗДІЛ 3.  
ВРАХУВАННЯ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ ПРИ  
ОПТИМАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ БСК, ЩО ВСТАНОВЛЕНІ НА  
ПІДПРИЄМСТВІ

3.1 Залежність потужності БСК від напруги у вузлі їх під'єднання

Використання БСК для компенсації реактивної потужності обумовлене рядом техніко-економічних переваг (в порівнянні з іншими компенсуючими пристроями), що полягають в наступному:

- можливість використання на низькій, середній і високій напругах;
- малі втрати активної потужності в БСК(0,0025-0,005 кВт/квар);
- низька питома вартість БСК (за 1 квар);
- простота експлуатації БСК та їх монтажу.

Одночасно із перевагами БСК мають ряд недоліків, одним з яких є зміна продуктивності конденсатора при відхиленнях напруги та частоти [1] від номінальних значень.

$$Q_K = Q_H \cdot \left( \frac{U_\phi}{U_H} \right)^2 \cdot \left( \frac{f_\phi}{f_H} \right) \quad (3.1)$$

де  $Q_K$  - фактична потужність, що генерується БСК;

$U_\phi$  та  $f_\phi$  - фактичні напруга та частота в місці приєднання БСК;

$Q_H$ ,  $U_H$  та  $f_H$  - відповідно номінальні значення потужності БСК, напруги, та частоти.

Оскільки частота мережі згідно з [2] змінюється в незначних межах ( $\pm 0,2$  Гц), її впливом можна знехтувати, і рівняння (2.1) прийме вигляд:

$$Q_K = Q_H \cdot \left( \frac{U_\Phi}{U_H} \right)^2 \quad (3.2)$$

Таким чином, при зниженні напруги мережі реактивна потужність БСК, яка генерується, зменшується, що призводить до додаткового зниження напруги, при підвищенні напруги – навпаки. В цьому виявляється від’ємний регулюючий ефект БСК.

Відхилення напруги в розподільчих мережах змінюється постійно протягом доби, і обумовлене такими причинами:

- добові, сезонні і технологічні зміни потужності навантаження;
- зміна потужності генераторів і компенсуючі пристрої;
- зміни схеми і параметрів електричної мережі;
- як результат загальноприйнятого укладу життя людей.

Аналіз рівняння (3.2) свідчить, що вже при відхиленнях напруги в межах  $\pm 5\%$  (регламентованих ГОСТ 13109-97) потужність ступенів БСК зміниться на  $\pm 10\%$ . Це може призвести до суттєвих неточностей у прийнятті рішень. Наслідком може бути прийняття недопустимих рішень або до зниження ефективності керування.

В дійсності, відхилення напруги у вузлі установки БСК може виходити за допустимі межі, оскільки відхилення напруги регламентується на затискачах електроприймача.

## 3.2 Управління КРП в промислових мережах 0,4 кВ при нехтуванні відхиленням напруги у вузлі їх під’єднання

### 3.2.1 Математична модель прийняття рішення та її аналіз. Управління БСК, які використовується для компенсації реактивної потужності, виконується в дискретні моменти часу і полягає в тому, що на основі інформації про параметри стану системи знаходиться та реалізується оптимальний вектор управління. За крок дискретизації можна прийняти



інтервал часу, в межах якого параметри стану практично є незмінними, наприклад, таким, яким він приймається при побудові графіків активних та реактивних навантажень – 1 година. Для підприємств із більшою динамікою електричних режимів можуть бути прийняті менші проміжки часу. Обґрунтування тривалості інтервалів часу при такому керуванні є окремою науковою задачею. Щоб врахувати таку особливість технічної реалізації управління БСК, для розв'язання такої задачі оптимального управління застосуємо відомий підхід [6], який полягає в тому, що задача оптимального управління зводиться до розв'язання послідовності задач дослідження операцій.

Методологія дослідження операцій передбачає побудову оптимізаційної математичної моделі. Вона розробляється з урахуванням конструктивних особливостей БСК та всіх можливих їх впливів на інші параметри електричного режиму, які є суттєвими для моменту прийняття технічного рішення.

Умовою вирішення оптимізаційної моделі є наявність кількісного критерію ефективності. Аналітичний опис критерія ефективності прийнято називати цільовою функцією. У випадках, коли кількісного критерія ефективності задача не має, то її вирішити математичними методами не можна.

Для задач керування БСК критерієм ефективності можуть бути: реактивна потужність по лінії живлення, втрати потужності в елементах системи живлення, плата за спожиту реактивну енергію та інші.

Крім дискретності в часі задача оптимального керування за допомогою БСК є дискретною, оскільки БСК має окремі дискретні секції. Задача компенсації реактивної потужності полягає в тому, що за результатами розрахунку необхідно визначити які секції БСК необхідно включити. Тому математична модель за якою приймається рішення для дискретного моменту часу є також дискретною.

В розробленій математичній моделі за критерій ефективності впливу керування прийнято мінімум реактивної потужності на вводі, що забезпечує найповніше використання наявних потужностей БСК та забезпечення мінімуму плати за реактивну енергію. Цей критерій має економічний зміст, оскільки він пропорційний активним втратам потужності в елементах системи живлення, які можна економічно оцінити. Крім того, плата за спожиту реактивну енергію підприємством буде також мінімальною.

Для режиму мінімальних навантажень системи в [3-5] пропонується знаходити рішення з управління за критерієм мінімуму реактивної потужності лінії живлення та згаданих технічних обмежень за допомогою дискретних математичних моделей:

$$\begin{cases} Q' - \Delta Q_n \cdot X \rightarrow \min \\ X + \bar{X} = n \\ Q' - \Delta Q_n \cdot X \geq Q_{\text{доп.}} \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} Q' - \Delta Q_n \cdot X \rightarrow \min \\ X + \bar{X} = n \\ U' + \Delta U_n \cdot X \leq U_{\text{max. доп.}} \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0, \end{cases} \quad (3.9)$$

де  $Q'$  - природне (в припущенні, що всі БСК відключені) споживання реактивної потужності по даному приєднанню;

$\Delta Q_n$  - матриця номінальних потужностей ступенів БСК розмірністю  $l \times m$ , де  $m$  - кількість секцій БСК;

$Q_{\text{доп.}}$  - допустима реактивна потужність споживання чи генерації;

$X$  - вектор управління, розмірністю  $m \times l$ , що складається з нулів ("0"-означає, що відповідну секцію БСК доцільно виключити) та одиниць ("1"-відповідну секцію БСК - включити);

$n$  - одинична стовпцева матриця, розмірністю  $m \times 1$ ;

$U'$  - напруга на шинах ТП за умови, що всі секції БСК виключені;

$U_{\text{max. доп}}$  - максимально допустиме значення рівня напруги;

$\Delta U_n$  - матриця добавок напруги, що мають місце внаслідок включення відповідних секцій БСК (номінальної потужності), розмірністю  $1 \times m$ ;

$\bar{X}$  - вектор, кожна компонента якого  $\bar{x}_i$  пов'язана з відповідною компонентою вектора  $X$  -  $x_i$  так, що коли  $x_i = 1$ , то  $\bar{x}_i = 0$  і навпаки;

$\forall$  - знак логічної операції „АБО”.

Математичні моделі (3.8) та (3.9) слід віднести до класу цілочислових, що зумовлено особливістю конструктивного виконання БСК, яка дозволяє включення або відключення окремих секцій, що мають дискретні параметри. Моделі дозволяють знайти такі вектори керування (визначити секції БСК, які доцільно включати), що забезпечують мінімальне споживання реактивної потужності по даному вузлу навантаження. Мінімальне значення реактивної потужності обмежується величиною  $Q_{\text{доп}}$  і в реальній ситуації забезпечується відповідним обмеженням моделі (3.8). Така потреба може бути пов'язана, наприклад, з недопустимістю зворотних потоків реактивної потужності від мереж споживання в мережі живлення, або вимогами електричної системи до залишкового споживання потужності (у випадку, коли підприємство залучене до регулювання реактивної потужності в енергетичному районі, що зафіксовано в договорі на поставку електроенергії). Допустиме відхилення напруги (згідно вимогам ГОСТ 13109-97) в вузлі приєднання БСК забезпечується технічним обмеженням математичної моделі (3.9).

В [3, 5] вказується недоцільність синтезування єдиної математичної моделі через суттєве збільшення об'єму розрахунків та складність алгоритму її аналізу. Доцільною є розробка множини математичних моделей для всіх можливих випадків, і вибір конкретної з них визначається алгоритмом



де  $f_k$  - оцінка стану системи на  $k$ -му етапі – реактивна потужність на вводі, якщо реалізувати всі рішення, що прийняті на попередніх етапах, включаючи даний.

Обчислювальний процес припиняється на етапі  $(n+1)$ , коли множина  $D_{(n+1)}$  виявиться пустою.

Знаходження вектора управління БСК у відповідності до математичних моделей (3.8)-(3.10) за методом динамічного програмування з урахуванням технічних обмежень згідно [4] слід здійснювати за таким алгоритмом:

Крок 1. Робиться оцінка станів системи в припущенні, що здійснюється почергове включення кожної із ступенів БСК та вибирається для остаточного включення ступінь, що забезпечує максимальний ефект. Відповідний цьому стан системи фіксується. Потужність даної секції вилучається із подальшого розгляду.

Крок 2. Визначається множина допустимих для подальшого включення ступенів БСК –  $D_k$ .

Крок 3. Якщо множина  $D_k$  пуста, то обчислення припиняються, інакше дається оцінка наступного стану системи в припущенні, що почергово включаються ступені БСК, що є компонентами множини  $D_k$ . Для остаточного включення вибирається ступінь, що забезпечує максимальний ефект, фіксується відповідний стан системи та здійснюється перехід до кроку 2.

Блок-схема алгоритму представлена на рис. 3.3.

Розв'язки, що знаходяться за математичними моделями (3.7)-(3.9) не враховують можливих післядій (зміну рівнів напруги, характеристик стійкості вузлів навантаження, зміну електроспоживання навантаженням за статичними характеристиками). Отримані результати можуть бути використаними у випадках коли явищами післядії можна нехтувати [4, 7].

3.2 Управління КРП в промислових мережах 0,4 кВ при нехтуванні відхиленням напруги у вузлі їх під'єднання

3.2.1 Математична модель прийняття рішення та її аналіз. Для ілюстрації працездатності алгоритму, а також з метою можливості порівняння результатів керування при врахуванні та нехтуванні відхиленнями напруги знайдемо розв'язки для наступного тестового прикладу:

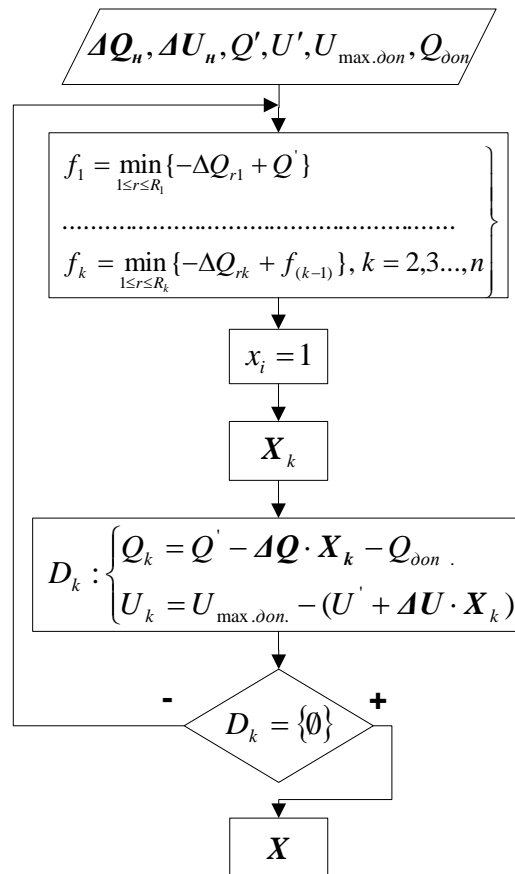


Рисунок 3.3 – Блок схема знаходження вектора керування БСК за методом динамічного програмування

### 3.2.2 Розрахунок тестової задачі. Приклад 3.1

#### ПРИКЛАД 3.1

Для схеми, рис. 3.4, забезпечити мінімальні втрати активної потужності в лінії шляхом включення відповідних секцій БСК за умови, що напруга на збірних шинах не повинна перевищувати  $U_{\text{max.don}} = 405$  В. Нижнє порогове значення реактивної потужності вводу становить  $Q_{\text{дон}} = 0$  квар. Необхідні для

вирішення задачі параметри схеми та режиму наведені на рис. 3.4, де  $U_{\text{факт}}$ ,  $S$  – фактична напруга та потужність навантаження на момент прийняття керуючого рішення;  $\Delta Q_n$  – матриця номінальних потужностей секцій БСК.

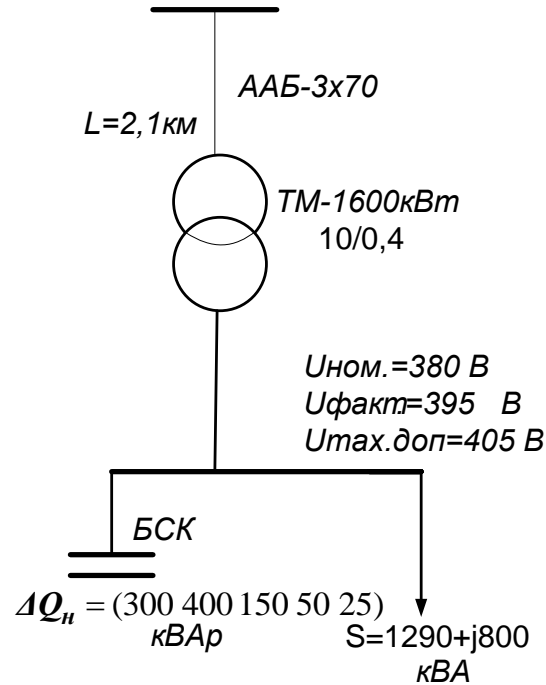


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема і вихідні дані тестової задачі

Розв'яжемо цю задачу за математичною моделлю (3.10) згідно алгоритму 1:

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ. Математична модель для умов цього прикладу формалізується в наступному вигляді:

$$\begin{cases} 800 - (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ 800 - (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \mathbf{X} \geq 0 \\ 395 + (5,45 \ 7,26 \ 2,72 \ 0,91 \ 0,45) \cdot \mathbf{X} \leq U_{\text{max. доп.}} \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

де  $\mathbf{X}^t = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5)$ ;

$\bar{\mathbf{X}}^t = (\bar{x}_1 \ \bar{x}_2 \ \bar{x}_3 \ \bar{x}_4 \ \bar{x}_5)$ ;

$$\mathbf{n}^t = (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1);$$

$$\Delta U = \Delta Q_H \cdot \frac{x_\Sigma}{U_H} = (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \frac{0,0069 \cdot 10^{-3}}{380} = (5,45 \ 7,26 \ 2,72 \ 0,91 \ 0,45) \text{ В};$$

$$x_\Sigma = x_T + x_L = 0,0066 + 0,0003 = 0,0069 \text{ Ом};$$

$x_m$  – реактивний опір трансформатора;

$x_l$  – реактивний опір кабельної лінії.

Етап 1:

Відповідно до (3.10) виконаємо оцінку станів системи:

$$f_1 = \min ((800 - 300) (800 - 400) (800 - 150) (800 - 50) (800 - 25)) = 400 \text{ квар} \quad (3.13)$$

отже найбільш ефективним на 1-му етапі є включення 2-ї ступені,  $x_2=1$ ,  $X_I^t=(0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$ .

Сформуємо  $D_I$ :

$$Q_1 = f_1 = 400 \text{ квар}, \quad (3.14)$$

де  $Q_1$ - некомпенсована вхідна реактивна потужність (або максимальна потужність ступені БСК, включення якої на 2-му етапі не призведе до порушення обмежень моделі (2.11));

$$U_1 = 405 - \left[ 395 + (5,45 \ 7,26 \ 2,72 \ 0,91 \ 0,45) \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right] = 405 - (395 + 7,26) = 2,74 \text{ В} \quad (2.15)$$

де  $U_1$  - максимально-допустима добавка напруги в результаті включення ступені БСК на 2-му етапі.

Вимогам (3.14) та (3.15) відповідає наступна множина допустимих до включення ступенів  $D_1$ :

$$D_1 = (150 \ 50 \ 25) \quad (3.16)$$

Так як множина  $D_1$  не пуста, то переходимо до наступного етапу.

Етап 2:



$$f_2 = \min ((400 - 150) (400 - 50) (400 - 25)) = 250 \text{ квар} \quad (3.17)$$

$$x_1=1, X_2^t=(0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0).$$

$$D_2 : \begin{cases} Q_2 = f_2 = 100 \text{ квар} \\ U_2 = 405 - (395 + (7,26 + 2,72)) = 0,02 \text{ В} \end{cases} \quad (3.18)$$

$D_2 = \{0\}$  - розрахунок завершено.

Отримані результати зведемо до табл. 3.1

Таблиця 3.1

Результати розрахунку оптимального вектора управління БСК

Алг. №	Оптимальний вектор керування	Сумарна потужність секцій БСК, квар		Реактивна потужність вводу, квар		Напруга на збірних шинах, В	
		Номінальна	Реальна	Що відповідає ном.потужнос-тям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК	Що відповідає ном.потужнос-тям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК
1	(0 1 1 0 0)	550	–	250	–	404,98	–

Примітка: в процесі отримання результатів вважалося, що можливі післядії від ввімкнення ступенів БСК чинять незначний вплив, яким можна знехтувати.

### 3.3 Математична модель, що враховує фактичний рівень напруги на затискачах БСК і алгоритм її аналізу

Неврахування залежності  $\Delta Q(U)$  в умовах суттєвого добового відхилення напруги для задач оперативного керування БСК може в деяких випадках привести до суттєвих похибок або до недопустимих кінцевих результатів. В зв'язку з цим, існуючі математичні моделі та методи їх аналізу потребують внесення суттєвих змін з метою отримання результатів відповідно режиму, який склався на момент прийняття рішення.

3.3.1 Складові взаємного впливу реактивної потужності та напруги. Врахування залежності  $\Delta Q(U)$  повинно містити наступні аспекти:

- врахування початкових умов;
- врахування післядії ввімкнених потужностей БСК.

Врахування початкових умов. Як показує досвід, в вузлах діючих розподільчих мереж 0,4 кВ, де підключені БСК, напруга в більшості режимів відрізняється від номінальній (якщо, звичайно в вузлі не має стабілізуючих пристроїв). Як наслідок, потужність секцій БСК майже завжди відрізняється від тієї, яка відповідає номінальній напрузі (в деяких режимах на 10% та більше, що було показано вище). Таким чином, вже при введенні в роботу першої з секцій і неврахуванні її реальної потужності може виникнути переток реактивної потужності з мереж підприємства в мережі енергосистеми (зворотній переток реактивної потужності) або перевищення напруги на електроприймачах. Перше та друге технічно недопустимо. Під врахуванням початкових умов будемо розуміти прийняття керуючих рішень виходячи з реактивних потужностей БСК, що відповідають реальним значенням напруги перед початком розрахунку.

Врахування післядії ввімкнених потужностей БСК. Ввімкнення чергової ступені БСК призводить до підвищення напруги в вузлі її підключення, а отже і до зростання потужності як щойно введеної ступені так і всіх ступенів, введених раніше, що викличе чергове підвищення напруги і т.д. Це явище далі будемо називати післядією від ввімкнення потужності БСК. Післядія може стати причиною того, що навіть при реалізації допустимого рішення (включенні ступені, розрахованої за фактичним значенням напруги) параметри, що контролюються (остаточна потужність вводу, напруга у вузлі), вийдуть за допустимі межі.

3.3.2 Математична модель, що враховує реальну потужність БСК та алгоритм її аналізу. Керування БСК з врахуванням реальної їх потужності (яка

відповідає реальній напрузі) та післядії від ввімкнення потужності БСК слід розглядати в двох варіантах. Перший – коли мета керування полягає в тому, щоб забезпечити, як мінімум, нижню межу допустимого відхилення напруги. Другий – те ж саме, але не порушити верхню межу. В першому випадку має місце недокомпенсація реактивної потужності і менше значення напруги, порівняно з розрахунковим. Але, оскільки відпайка трансформатора ТП (де зазвичай встановлюються БСК) вибирається таким чином, щоб забезпечити нижнє значення напруги в будь-якому режимі і, зрозуміло перекомпенсація в цьому випадку неможлива, то більш доцільним є розгляд другого випадку, коли можливими є порушення обмежень моделі керування. Розглянемо детально випадок управління БСК на межі максимальних значень як по реактивній потужності вводу, так і по напрузі.

Прийняття рішення по включенню секції БСК з метою зменшення втрат активної потужності може призвести до перевищення верхньої межі відхилення напруги. Щоб уникнути за таких обставин небажані впливи на електричний режим, вектор управління доцільно визначити у відповідності з математичною моделлю (3.19).

$$\begin{cases} Q' - \Delta Q(U) \cdot X \rightarrow \min \\ X + \bar{X} = n \\ Q' - \Delta Q(U) \cdot X \geq Q_{\text{доп.}} \\ U' + \Delta U(U) \cdot X \leq U_{\text{max. доп.}} \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases} \quad (3.19)$$

Математична модель (3.19) відрізняється від моделей управління (3.8)-(3.10) тим, що містить значення (елементи матриць  $\Delta Q$  та  $\Delta U$ ), що функціонально залежать від рівнів напруги, які в свою чергу залежать від реалізації результатів розв'язування задачі. Ця обставина потребує розробки алгоритму аналізу для даної математичної моделі.

Аналіз математичної моделі (3.19), як і в попередньому випадку виконаємо методом динамічного програмування. Метод динамічного програмування передбачає, що вибір управління на  $k$ -му кроці не впливає на попередні кроки, а стан на початку цього кроку є функцією лише попереднього стану і обраного на ньому керування (відсутність післядій) [8]. Процес обчислень за методом динамічного програмування для даної задачі буде мати особливості в порівнянні з його класичною схемою, які пов'язані з наявністю післядії. Вирішити сформульовану задачу можна користуючись розробленим алгоритмом.

Обчислення вектора оптимального управління потужністю БСК за даним алгоритмом виконується на двох рівнях:

I рівень – попереднє рішення про включення, що приймається на основі результатів виміру напруги в вузлі підключення керуючись рекурентними співвідношеннями методу динамічного програмування (3.11);

II рівень – остаточне рішення, визначається на основі розрахунку напруги, що буде на БСК внаслідок реалізації рішення I-го рівня з врахуванням всіх можливих післядій.

Врахування післядії ввімкнення чергової ступені БСК передбачається проводити шляхом ітераційних уточнень всієї ввімкненої (як на даному, так і на всіх попередніх етапах) потужності. Степінь наближення в процесі цього може визначатись, наприклад, класом точності вимірювальних приладів, що забезпечують необхідною оперативною інформацією.

На кожному рівні обчислень формується множина допустимих для ввімкнення ступенів БСК з якої здійснюється вибір найбільш ефективного рішення.

За такої схеми проведення обчислень виключається можливість порушення обмежень математичної моделі (3.19) по остаточній потужності вводу та максимально-допустимій напрузі в вузлі, що фізично відображається в неможливості виконання хибних комутацій БСК.

Знаходження оптимального вектора управління БСК у відповідності до математичної моделі (3.19) здійснюється за наступним алгоритмом (алгоритм 2):

Крок 1. Визначаються потужності секцій БСК і добавки напруги від їх можливого ввімкнення за фактичною напругою на затискачах;

Крок 2. Знаходиться попередня (для k-го етапу) множина допустимих до включення потужностей секцій БСК  $D_k^{\Pi}$ .

Крок 3. Якщо множина  $D_k^{\Pi}$  пуста, то обчислення припиняються. Оптимальний вектор управління знайдений (якщо  $k=1$ , то вектор керування  $X$  складається з нулів). Інакше перехід до кроку 4.

Крок 4. Робиться оцінка станів системи в припущенні, що здійснюється по чергове включення кожної із ступенів БСК, що є компонентами  $D_k^{\Pi}$  та вибирається для остаточного включення ступінь, що забезпечує максимальний ефект. Відповідний цьому стан системи фіксується — отримано попереднє рішення про ввімкнення ступені  $x_i^{\Pi}$ .

Крок 5. Уточнення із заданою точністю стану системи з врахуванням післядії включення секції БСК.

Крок 6. Формування  $D_k^K$  на основі уточнених параметрів БСК. Перевірка попередньо отриманого рішення  $x_i^{\Pi}$  на належність  $D_k^K$ . Якщо  $x_i^{\Pi} \in D_k^K$ , то рішення приймається як остаточне і реалізується, перехід до кроку 2 (на основі нового стану БСК). В іншому випадку ця ступінь виключається з множини  $D_k^{\Pi}$  як на цьому, так і на наступних етапах, перехід до кроку 2 ( $D_{k+1}^{\Pi} = D_k^K$ ).

За етап в цьому алгоритмі, на відміну від класичного методу динамічного програмування, розуміється як отримання остаточного рішення про ввімкнення чергової ступені, так і рішення про виключення з розгляду ступені, яка задовольняла умовам (обмеженням) лише при попередньому розрахунку.

Запропонований алгоритм у вигляді блок - схем представлений на рис.3.5.

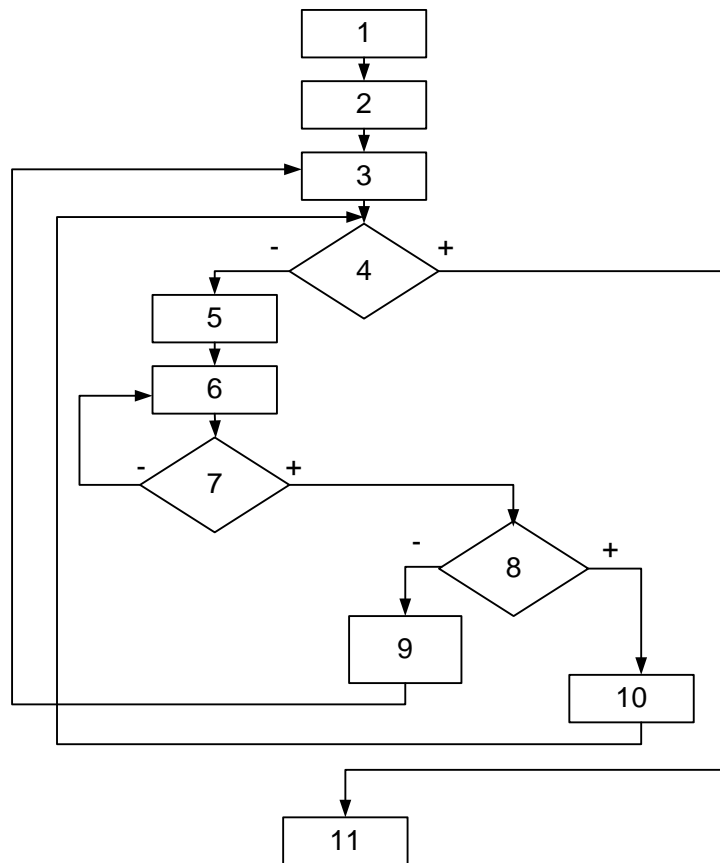


Рисунок 3.5 – Загальна блок-схема алгоритму розрахунку оптимального вектора керування БСК з врахуванням післядії

В блок-схемі, рис. 3.5, зображені блоки мають такий зміст:

- 1 – отримання початкових даних;
- 2 – визначення потужностей секцій БСК і добавок напруги від їх ввімкнення за фактичною напругою на затискачах;
- 3 – знаходження попередньої множини допустимих до включення потужностей секцій БСК  $D_k^{\Pi}$ ;
- 4 – перевірка, чи  $D_k^{\Pi}$  – не пуста множина;
- 5 – прийняття попереднього рішення про ввімкнення чергової секції, на основі рекурентних співвідношень (3.11);
- 6 – уточнення стану системи з врахуванням післядії включення секції БСК;
- 7 – перевірка умови достатності наближення;

8 – формування  $D_k^K$  на основі уточнених значень. Перевірка належності потужності секції БСК, що відповідає попередньо-прийнятому рішенню, множині  $D_k^K$ ;

9 – виключення потужності секції БСК, що відповідає попередньо-отриманому рішенню, з допустимих розв’язків;

10 – прийняття кінцевого рішення про ввімкнення чергової секції БСК;

11 – оптимальне рішення із включення БСК отримано.

3.3.3 Розрахунок тестової задачі. Приклад 3.2. Для умов прикладу 3.1 визначити оптимальний вектор управління з урахуванням реальних напруг і післядії від ввімкнення ступенів БСК.

РОЗВ’ЯЗУВАННЯ. Визначимо початкові умови (що відповідають фактичному значенню напруги  $U_\phi=395$  В):

$$\Delta Q = (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \left( \frac{395}{380} \right)^2 = (324 \ 432 \ 162 \ 54 \ 27) \text{ квар};$$

$$\Delta U = (324 \ 432 \ 162 \ 54 \ 27) \cdot \left( \frac{0,0069}{0,38} \right) = (5,88 \ 7,84 \ 2,94 \ 0,98 \ 0,49) \text{ В}.$$

Формалізуємо математичну модель на початок розрахунків в числовому вигляді:

$$\begin{cases} 800 - (324 \ 432 \ 162 \ 54 \ 27) \cdot \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \overline{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ 800 - (324 \ 432 \ 162 \ 54 \ 27) \geq 0 \\ 395 + (5,88 \ 7,84 \ 2,94 \ 0,98 \ 0,49) \cdot \mathbf{X} \leq 405 \\ x_i, \overline{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases}$$

Етап 1.

Формуємо попередню множину допустимих до включення на цьому етапі ступенів:

$$D_k^{\Pi} : \begin{cases} Q_k = 800 - 0 - 0 = 800 \text{ квар}; \\ U_k = 405 - (395 + 0) = 10 \text{ В}; \end{cases}$$

$$D_k^{\Pi} = \Delta Q_H = (324 \ 432 \ 162 \ 54 \ 27) \text{ квар};$$

Так як  $D_1^{\Pi}$  не пуста множина відповідно до (3.10) виконаємо оцінку станів системи:

$$f_1 = \min ((800 - 324) (800 - 432) (800 - 162) (800 - 54) (800 - 27)) = 368 \text{ квар}$$

отже найбільш ефективним є включення 2-ї ступені. Попередньо приймаємо рішення про включення цієї ступені БСК:  $x_2^{\Pi}=1$ ,  $(X_I^{\Pi})^t=(0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$ .

Значення напруги, яке встановиться внаслідок ввімкнення ступені  $x_2$ :

$$U_1^{\Pi} = 395 + 7,84 = 402,84 \text{ В};$$

Врахуємо післядію:

$$\Delta Q_{1,1} = (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \left( \frac{402,84}{380} \right)^2 = (337,15 \ 449,53 \ 168,57 \ 56,28 \ 28,14) \text{ квар};$$

$$\Delta U_{1,1} = (337,15 \ 449,53 \ 168,57 \ 56,28 \ 28,14) \cdot \frac{0,0069}{0,38} = (6,12 \ 8,16 \ 3,06 \ 1,02 \ 0,51) \text{ В};$$

$$U_{1,1}^K = 395 + 8,16 = 403,16 \text{ В};$$

$|403,16 - 402,84| = 0,36 > 0,1 \text{ В}$  - необхідної точності (0,1 В) не досягнуто, розрахунок післядії продовжується.

$$\Delta Q_{1,2} = (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \left( \frac{403,16}{380} \right)^2 = (337,69 \ 450,27 \ 168,85 \ 56,28 \ 28,14) \text{ квар};$$

$$\Delta U_{1,2} = (337,69 \ 450,27 \ 168,85 \ 56,28 \ 28,14) \cdot \frac{0,0069}{0,38} = (6,13 \ 8,18 \ 3,07 \ 1,02 \ 0,51) \text{ В};$$

$$U_{1,2}^K = 395 + 8,18 = 403,18 \text{ В};$$

$$|403,18 - 403,16| = 0,02 < 0,1 \text{ В};$$

Перевіримо отримане рішення ( $x_2=1$ ), враховуючи післядію, на відповідність обмеженням математичної моделі керування:

$$Q_{\text{ост}} = 800 - 450 = 350 > 0 \text{ квар} - \text{нескомпенсована потужність вводу};$$



$$395 + 8,18 = 403,18 < 405 \text{ В.}$$

Отже, як остаточне, на першому етапі приймаємо рішення про ввімкнення ступені 450 квар (номінальна потужність 400 квар).

Розрахунки наступних етапів проводяться аналогічно. Отримані результати зведемо до табл. 3.2. Для порівняння та аналізу до таблиці також зведені результати управління за алгоритмом 1 (приклад 3.1), які розраховані для тих же вихідних умов.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку вектора управління та режиму в мережі за двома алгоритмами.

Алг. №	Оптимальний вектор керування	Сумарна потужність секцій БСК, квар		Реактивна потужність вводу, квар		Напруга на збірних шинах, В		Висновок
		Номінальна	Реальна	Що відповідає ном. потужностям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК	Що відповідає ном. потужностям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК	
1	(0 1 1 0 0)	550	629	250	171	404,98	406,41	Керування недопустиме
2	(0 1 0 1 1)	475	539	325	261	не розрах.	404,8	Керування допустиме

Як видно з табл. 3.2, результат, отриманий за алгоритмом 1 – для конкретного випадку, що сформульований в умові прикладу недопустимий, оскільки його реалізація забезпечить рівень напруги у вузлі 406,41 В, що більше за  $U_{\text{доп}} = 405 \text{ В}$ . В той же час розрахунки, що виконані на підставі допущень, покладених в основу алгоритму 1, дають допустиме значення напруги 404,98 В. Результат, знайдений за алгоритмом 2 допустимий, тому що реалізація його супроводжується збільшенням напруги до значення 404,8 В. Крім того, в першому випадку залишається неврахованою додаткова

реактивна потужність, що генерується БСК, в 79 квар (що складає 14,4% від номінальної ввімкненої потужності). Тобто можливі ситуації, коли реактивна потужність вводу  $Q' - \Delta Q(U) \cdot X$ , що відповідає реалізації результатів, отриманих за алгоритмом 1, набуде недопустимих значень (випадок, коли обмеження на допустиму величину реактивної потужності вводу є більш „жорстким” в порівнянні з обмеженням на допустиме значення напруги).

### 3.4 Висновки до розділу 3

1. В системах електропостачання можуть мати місце випадки, коли рішення по керуванню БСК, отримане за їх номінальними параметрами, виявляється недопустимим. Тому рішення по визначенню керуючого впливу необхідно приймати виходячи з реальних потужностей секцій БСК (потужностей, що відповідають реальній напрузі на БСК) та ефекту післядії ввімкненої потужності.

2. У випадках стабільності (або незначних відхилень) напруги у вузлі приєднання БСК, малого опору живлячої мережі, при невеликих потужностях БСК врахування залежності потужності від напруги та післядії по напрузі не має сенсу. Проте необхідно застосувати запропонований алгоритм у випадку керування БСК на межі максимальних значень, як по реактивній потужності вводу, так і по напрузі, коли можливе порушення відповідних обмежень.

3. Отримані співвідношення та побудовані номограми дають можливість обґрунтувати доцільність врахування реальної потужності БСК та явища післядії для задачі оптимального керування реактивних навантажень в розподільчих мережах з відомими параметрами.

4. Розроблена цілочислова математична модель, що дозволяє знайти вектор керування для БСК виходячи з реальних потужностей її секцій та ефекту

післядії для випадку, коли реалізація керування створює загрозу перевищення верхньої допустимої межі відхилення напруги.

5. Аналіз математичної моделі можна здійснити за розробленим алгоритмом, в основі якого модифікований метод динамічного програмування, що дозволяє враховувати як обмеження математичної моделі, так і післядію.

## РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

### 4.1 Розрахунок чисельності обслуговуючого та ремонтного персоналу

Чисельність електроперсоналу визначається трудомісткістю поточного ремонту та технічного обслуговування електрообладнання та мереж. Планова трудомісткість відповідного виду робіт  $T'$  ( $T_{п р}$ ,  $T_{огл}$ ) визначається :

$$T' = \Pi * t_{норм} * h \quad (4.1)$$

де  $\Pi$  – число ремонтів даного виду за рік, що приходить на одиницю обладнання;

$t_{норм}$  – норма трудомісткості поточного ремонту або огляду, люд\*год;

$h$  – кількість обладнання даного виду.

Розрахунок планової трудомісткості технічного обслуговування виконується :

$$T_{т о} = 12 * t_{норм} * k_{с р} \quad (4.2)$$

де  $t_{норм}$  – планова трудомісткість поточного ремонту, люд\*год;

$k_{с р}$  – коефіцієнт складності ремонту, 1/міс.

Розрахунок виконаємо у табличній формі за [11].

Потреба в ремонтному персоналі визначається за формулою:

$$N_{ПР} = \frac{T_{ПР}}{\Phi_{д} * K_{вн}}, \quad (4.3)$$

де  $\Phi_{д}$  – дійсний фонд робочого часу за рік,  $\Phi_{д}=1850-1900$  год;

Потреба в ремонтному персоналі визначається за формулою:

$$N_{ПР} = \frac{T_{ПР}}{\Phi_{д} * K_{вн}}, \quad (4.3)$$

де  $\Phi_{д}$  – дійсний фонд робочого часу за рік,  $\Phi_{д}=1850-1900$  год;

Таблиця 4.1 – Розрахунок планової трудомісткості технічного обслуговування [29]

Обладнання та мережі	Поточний ремонт				Огляди			Технічне обслуговування, люд*год,
	Кількість	Число днів обладнання, рем/рік	Норми трудомісткості, люд*год	Загальна трудомісткість, люд*год	Число оглядів на одиницю обладнання, 1/рік	Норми трудомісткості, люд*год	Загальна трудомісткість, люд*год	
1.Кабельні лінії зовнішньої системи електропост, км ААБ(3*50)	1,3	1	15	63	-	-	-	180
2. Силовий трансформатор ТМ1600/10	2	0,33	60	39,6	12	4,5	108	147,6
3.Батарея конденсаторів ККУ-0,4-300/12-25-21УЗ	2	1	20	40	12	8,4	201,6	204,2
4. Батарея конденсаторів ККУ-0,4-60/12-5-21УЗ	2	1	20	40	12	8,4	201,6	102,1
Всього				182,6			511,2	633,9

$K_{вн}$  - коефіцієнт виконання норм,  $K_{вн}=1,1$  – для ремонтного персоналу та  $K_{вн}=1,05$  – для експлуатаційного,

$$N_{ГР} = \frac{182,6}{1850 * 1,1} = 0,09 \text{ людини.}$$

Отриманий результат заокруглимо до цілого числа і приймемо до уваги те, що ряд робіт по ремонту електрообладнання у відповідності з правилами безпеки повинні виконувати двоє людей [10].

Приймемо кількість ремонтного персоналу 2 чол.

Розрахуємо потребу в експлуатаційному персоналі:

$$N_{\text{обсл}} = \frac{T_{\text{огл}} + T_{\text{го}}}{\Phi_{\text{д}} * K_{\text{вн}}} = \frac{511,2 + 633,9}{1850 * 1,05} = 0,59 \text{ людини.} \quad (4.4)$$

Приймаємо кількість експлуатаційного персоналу 2 чоловіки.

#### 4.2 Розрахунок витрат по заробітній платі

Визначимо річний фонд прямої заробітної плати для робочих, що зайняті на роботах з експлуатації та обслуговуванні електрообладнання та мереж

$$\Phi_{\text{п}} = N_{\text{обс}} \cdot \beta_{\text{в}} \cdot t_{\text{ч.е}} \cdot \Phi_{\text{д}}, \quad (4.5)$$

де  $\beta_{\text{в}}$  - коефіцієнт використання річного номінального фонду робочого часу,  $\beta_{\text{в}} = 0,9$ ;

$t_{\text{ч.е}}$  - годинна тарифна ставка, що відповідає середньому тарифному розряду експлуатаційних робочих, що дорівнює 36 грн/год.

$$\Phi_{\text{п}} = 2 * 0,9 * 36 * 1850 = 119880 \text{ грн.}$$

Річний фонд прямої заробітної плати для робочих, що виконують

поточний ремонт електрообладнання та електромереж:

$$\Phi_B = T_{\text{пр}} \cdot t_{\text{г.в}}, \quad (4.6)$$

де  $t_{\text{ч.в}}$  - годинна тарифна ставка відрядників, що відповідає середньому розряду ремонтних робіт,  $t_{\text{г.в}} = 40,5$  грн/год.

$$\Phi_B = 2 \cdot 182,6 \cdot 40,5 = 14790,6 \text{ грн.}$$

Фонд основної заробітної плати:

- на експлуатацію та обслуговування

$$\Phi_{\text{о.п}} = \Phi_{\text{п}} (1 + 0,05 + 0,01 + \alpha),$$

де 0.05 (5%) - доля доплат за роботу в нічний час;

0.01 (1%) - доля доплат за роботу в святкові дні;

$\alpha$  - доля преміальних доплат,  $\alpha = 0,2$ ,

$$\Phi_{\text{о.п}} = 119880 (1 + 0,05 + 0,01 + 0,2) = 151048,8 \text{ грн.}$$

- на поточний ремонт електрообладнання та мереж

$$\Phi_{\text{о.в}} = \Phi_B (1 + 0,05 + 0,01 + \alpha) = 14790,6 (1 + 0,05 + 0,01 + 0,2) = 18636,2 \text{ грн.}$$

Величина сумарного фонду заробітної плати з врахуванням додаткової заробітної плати:

$$\Phi_{\text{об.п}} = 151048,8 \cdot (1 + 0,075) = 162377,4 \text{ грн/рік.}$$

$$\Phi_{\text{об.в}} = 18636,2 \cdot (1 + 0,075) = 20033,9 \text{ грн/рік}$$

де 0,075 = доля додаткової заробітної плати.

Врахувавши нарахування на заробітну плату (фонд соціального

страхування - 4%; фонд зайнятості - 1.5%; пенсійний фонд - 32%), визначимо витрати підприємства на заробітну плату робітникам, що забезпечують експлуатацію та обслуговування електрообладнання та ремонтному енергоперсоналу:

$$C_{зп.т.о} = \Phi_{об.п} (1+0,04+0,015+0,32) = 217585,7 \text{ грн};$$

$$C_{зп.п.р.} = \Phi_{об.в} (1+0,04+0,015+0,32) = 27546,6 \text{ грн.}$$

4.3 Розрахунок витрат підприємства на матеріали, що потрібні на всі види ремонтів та технічне обслуговування електрообладнання та електромереж

Розрахунок потреби кількості основних матеріалів для всіх видів ремонтів та технічного обслуговування виконаємо на основі норм витрат матеріалів. В системі ППРОСПЭ витрати матеріалів, віднесені на 100 люд.-год трудомісткості ремонтів, включаючи і технічне обслуговування. Розрахунок виконаємо в табличній формі, таблиця 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунок потреби кількості основних матеріалів

Назва матеріалу	Ціна, грн	Норма витрат на 100люд.-год	Вартість матеріалу, грн
<b>Силові трансформатори</b>			
Сталь сортова, кг	33,3	6	200
Припой олов'яно-свинцевий, кг	409,6	0,02	8,2
Припой мідно-фосфористий, кг	129,5	0.03	3,9
Електроди, кг	77,2	0.15	12
Кріпильні вироби, кг	69,2	2.0	138
Провід, м	130,7	0,5	653
Мідь/алюміній (голий), кг	145,3	62	9009
Картон електроізоляційний, кг	54,8	1,4	77
Кабельна бумага, кг	48	0,6	29
Лакотканина, м	101,0	0,2	20,2
Стрічка кіперна, кг	328	40	13120
Стрічка асбестова, електроіз. кг	9,2	0,05	0,46
Лак ізоляційний, кг	47,6	1,5	71,4



Емалі ґрунтові, кг	59,4	2,5	89,1
Масло трансформаторне, кг	36	0,58	20,9
Бензин, кг	300	0,7	210
Розчинник, кг	98,9	0,8	79
Маслостійка гума, кг	121	0,4	48,4
Гума профільна, кг	121	0,13	16
Шнур кручений, м	101,2	0,3	30,4
Обтирочний матеріал, кг	72	0,4	29
ВСЬОГО			23077
Кабельна лінія			
Сталь сортова, кг	166	2	332
Електроди, кг	77,2	0,1	7,7
ВСЬОГО			340

Вартість матеріалів для поточного ремонту:

$$C_{M \text{ ПР.}} = 0.01 \sum_{i=1}^f T_{\text{п.р.}i} \sum_{j=1}^g m_{\text{пр.}i} \dots \cdot {}^j, \quad (4.7)$$

де  $f$  - кількість груп обладнання та мереж;

$T_{\text{п.р.}i}$  - трудомісткість поточного ремонту для  $i$  групи;

$g$  - число різновидності матеріалів;

$m_{\text{пр.}j}$  - норма витрати  $j$ -го виду матеріалу на 100 люд.-год. трудомісткості поточного ремонту;

$C_{mj}$  - ціна одиниці матеріалу, грн.

$$C_{M \text{ ПР.}} = 0,01 [39,6 * 23077 + (81 + 57,8 + 12 + 47) * 340] = 9819 \text{ грн.}$$

Планова вартість матеріалів для технічного обслуговування

$$C_{\text{т.т.}} = 0.01 \sum_{i=1}^f T_{\text{т.т.}i} \sum_{j=1}^g m_{\text{т.т.}j} \dots \cdot {}^j, \quad (4.8)$$

де  $T_{\text{т.т.}i}$  - трудомісткість технічного обслуговування для всієї  $i$ -ої групи.

$$C_{M \text{ ТО.}} = 0,01 [147,6 * 2 * 23077 + 180 * 2 * 340] = 68932 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування

$$C_{\text{обс}} = C_{\text{зп.т.о}} + C_{\text{м.т.о}} = 217585,7 + 68932 = 286517,1 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт

$$C_{\text{п.р.}} = C_{\text{зп.п.р}} + C_{\text{м.п.р}} = 27546,6 + 9819 = 37365,6 \text{ грн}$$

#### 4.4 Визначення амортизаційних відрахувань та інших витрат

Амортизаційні відрахування визначимо за формулою

$$C_a = \sum_{i=1}^f P_{ai} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де  $P_{ai}$  - норма амортизаційних відрахувань для  $i$ -ої групи;

$K_i$  - капітальні вкладення в  $i$ -ту групу обладнання системи електропостачання.

$$C_a = [0,043 * 4670,53 * 1,7 + 0,064(2276,2 + 2276,2 + 2505,8)] * 10^3 = 793 * 10^3 \text{ грн.}$$

Інші витрати (витрати на допоміжні матеріали, послуги виробничим підрозділам підприємства, частина загально - заводських витрат) приймають в розмірі 25-30% від суми витрат на обслуговування, поточний ремонт та амортизацію:

$$\begin{aligned} C_i &= 0,25(C_{\text{обс}} + C_{\text{пр}} + C_a) = \\ &= 0,25 (286517,1 + 37365,6 + 793000) = 279220,5 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Таблиця 4.3 – Кошторис різних поточних витрат

Найменування статей	Втрати, грн	% до підсумку
Затрати на експлуатацію електро-обладнання та мереж	286517,1	20,5
Поточний ремонт	37365,6	2,6
Амортизаційні відрахування	793000	56,8
Інші витрати	279220,5	20,1
<b>ВСЬОГО</b>	<b>1396102</b>	

#### 4.5 Розрахунок плати за електроенергію

Величина корисно спожитої електроенергії на підприємстві за рік

$$\mathcal{E}_a = P_p T_M = 942,49 * 3000 = 2827470 \text{ кВт*год.} \quad (4.10)$$

Розрахуємо величину втрат електроенергії в лініях 10 кВ.

$$\Delta \mathcal{E} = 7497 \text{ кВт*год}$$

Втрати потужності в трансформаторах

$$\Delta P_T = 17,3 \text{ кВт}$$

Розрахуємо величину втрат електроенергії в трансформаторах.

$$\Delta \mathcal{E}_T = \Delta P_{mp} * \tau = 17,3 * 2000 * 10^{-3} = 34600 \text{ кВт*год.} \quad (4.11)$$

Загальна потреба підприємства в електроенергії

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_a + \Delta \mathcal{E}_л + \Delta \mathcal{E}_T = 2827470 + 7497 + 34600 = 2869567 \text{ кВт*год.}$$

Плата за електроенергію, що спожита підприємством. Тариф на

електроенергію становить 3,48 грн/кВт\*год [ 11].

$$\Pi = C_0 * \Xi = 3,48 * 10^{-3} * 2869567 = 9986093 \text{ тис. грн.}$$

#### 4.6 Собівартість електроенергії

Собівартість однієї корисно спожитої кіловат години електроенергії розраховується за формулою:

$$S = \frac{C_{\text{сум}} \cdot 100}{\Xi_a}, \quad (4.13)$$

де  $C_{\text{сум}}$  - величина сумарних витрат підприємства на електроенергію, тис. грн/рік;

$\Xi_a$  – річна кількість корисної споживаної підприємством електроенергії, тобто без обліку втрат у лініях і трансформаторах, кВт·год/рік.

$$C_{\text{сум}} = \Pi + C_n = 9986093 * 10^3 + 1396,102 * 10^3 = 9987489,1 * 10^3 \text{ грн};$$

$$S = \frac{9987489,1 * 100}{2827470} = 3,53 \text{ (грн/кВт·год)}.$$

#### 4.7 Висновки до розділу 4

1. За умови, що тариф на електроенергію 3,48 грн/кВт\*год [11], собівартість електроенергії для ТОВ «Вінницький інструментальний завод» становить 3,53 грн/кВт\*год

## РОЗДІЛ 5.

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Ефективність роботи системи електропостачання, що експлуатується на ТОВ «Вінницький інструментальний завод», може бути підвищеною якщо запровадити виконані розробки.

2. Для умов ТОВ «Вінницький інструментальний завод» оптимальним варіантом за річними приведеними витратами є установка двотрансформаторної підстанції з трансформаторами потужністю 1600 кВА, а виконання живильної лінії кабелем ААБ (3\*50).

3. Суттєве зниження активних втрат в трансформаторах та в лінії живлення з одночасним забезпеченням вимог енергосистеми що до споживання реактивної потужності до шин 0,4 кВ ТП слід під'єднати комплектні БСК серії ККУ-0,4 загальною потужністю 720 квар.

4. Ефективність компенсації реактивної потужності в мережах ТОВ «Вінницький інструментальний завод» може бути підвищеною шляхом врахування реальних напруг у вузлах під'єднання БСК та прийняття оперативних рішень, використовуючи розроблену оптимізаційну математичну модель.

5. За умови, що тариф на електроенергію 3,48 грн/кВт\*год, собівартість електроенергії для ТОВ «Вінницький інструментальний завод» становить 3,53 грн/кВт\*год.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бурбело М.Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків. Навчальний посібник з дисципліни «Електропостачання». – Вінниця: ВДТУ. 2002. – 140с.
2. Основы построения промышленных сетей / Г.М. Каялов, С.А. Каждан, И.Н. Ковалев, Э.Г. Куренный – М.: Энергия, 1978. – 320с.
3. Справочник по проектированию электроснабжения / Под редакцией Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 576 с.
4. Правила устройств электроустановок. М., Энергия, 1986.
5. Рудницький В.Г. Внутрішньозаводське електропостачання Київ Освіта України, 2013. – 286 с
6. ГОСТ 13109-97.Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения
7. Терешкевич Л. Б., Бандура І. О., Хоменко О. О. Метод розрахунку внутрішнього симетрування однофазних електроприймачів у вузлах чотирипровідної мережі. [Наукові нотатки](#). - 2019. - Вип. 65. - С. 249-253. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2019\\_65\\_40](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_65_40).
8. Рогальський Б.С. Проблеми енергозбереження. Зниження втрат електроенергії в електричних мережах: [навчальний посібник] - Вінниця: ВДТУ, 1996. – 112 с.
9. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов – .М.: ЭААС, 2009. – 456 с. – ISBN 978-5-93196-958-9.
10. Аввакумов В.Г. Методы не скалярной оптимизации и их приложения – К.:Вища школа, 1990. – 188 с.

11 Тарифы на электроэнергию для предприятий в 2021 году. Режим доступа: <https://delaenergy.systems/ru/articles/tarify-na-elektroenergiyu-dlya-predpriyatij-v-2021-godu/>

12. Милосердов В.О., Терешкевич Л.Б. Алгоритмізація оптимізаційних задач енергетики. – Вінниця.: ВНТУ, 2004. – 120 с.

13. Шишкин С.А. Компенсация реактивной мощности однофазных нагрузок низковольтных систем электроснабжения Силовая электроника. – 2007. – №3. – С. 122 – 125.

14. Кузнецов В.Г., Григорьев А.С., Данилюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с. – ISBN 5-12-002018-6.

15. Терешкевич Л.Б., Цибульський М.І. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання Технічна електродинаміка. – 2006. – №2. – С. 64–67.

16. Кравченко О.А. Электромагнитная совместимость: как решать проблему на государственном уровне Электропанорама. – 2003. – №4. – С. 38 – 40.

17. Иванов В.С., Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.

18. Жежеленко И.В., Рабинович М.А., Божко В.М. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях – К.: Техніка, 1981. – 160 с.

19. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Офіційний вісник України. – 2002. – №6. – С. 25 – 31.

20. Саати Т. Целочисленные методы оптимизации и связанные с ними экстремальные проблемы – М.: Мир, 1973. – 302 с.

21. Хемди А. Таха. Введение в исследование операций. – Вильнюс, 2007. – 912 с. – ISBN 0-13-032374-8.



22. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. Ч.1. – М.: Мир, 1986. – 347 с.
23. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. Ч.2 – М.: Мир, 1986. – 318 с.
24. Калихман И.Л., Войтенко М.А. Динамическое программирование в примерах и задачах – М.: Высшая школа, 1979. – 125 с.
25. Економіка підприємства. / Під ред. С.Ф. Покропивного.– К.: КНЕУ, 2001. – 526 с. – ISBN 966-574-148-9.
26. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі. ГКД 340.000.002 – 97. [Затв. наказом Міненерго України від 20.01.97]. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 1997. – 90 с.
27. Гительсон С.М. Экономические решения при проектировании систем электроснабжения промышленных предприятий – М.: Энергия, 1971. – 256 с.
28. Терешкевич Л.Б., Демов О.Д., Шулле Ю.А. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студентами спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» Вінниця, ВНТУ, 2018, – 42 с.
29. Терешкевич Л.Б., Цибульський М.І. Математичні методи керування несиметрією напруг в системах електропостачання // Технічна електродинаміка – 2006 – №2 – с. 64-67.
30. Синягин Н.Н. и др. Система планово-предупредительного ремонта оборудования и сетей промышленной энергии. - М.: Энергия, 1978.
31. ГОСТ 12.0.00374. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
32. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
33. ОНТП 24-86. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. МВД. СССР. - М., 1986.

34. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

УЗГОДЖЕНО

\_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО  
Зав. кафедри ЕСЕМ

д.т.н., проф. Бурбело М.Й. \_\_\_\_\_  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ**

до магістерської кваліфікаційної роботи

на тему:

**ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ  
ТОВАРИСТВА З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ  
«ВІННИЦЬКИЙ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИЙ ЗАВОД»**

08-17.МКР.002.05.100 ТЗ

Науковий керівник:

проф. Терешкевич Л.Б. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Виконавець: студент гр. ЕСЕ - 19м

Боберський А.І. \_\_\_\_\_  
(підпис)

Вінниця 2021 р.

## 1. ПІДСТАВА ДЛЯ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (МКР)

Робота виконується на підставі наказу ВНТУ за № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2021 р.

Дата початку роботи 1 вересня 2021 р.

Дата закінчення роботи 10 грудня 2021 р.

## 2. МЕТА І ПРИЗНАЧЕННЯ МКР. ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

а) *мета* – Метою роботи є оптимізація системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» шляхом розрахунку оптимальної кількості та потужності трансформаторних підстанцій, оптимальних перерізів ліній 10 кВ мереж підприємства, визначення оптимальних координат місця установки трансформаторних підстанцій та розрахувань оптимальних потужностей конденсаторних установок та розробка методу оптимального керування їх потужністю із врахуванням реальних напруг і вузлі їх під'єднання.

б) *призначення розробки* – виконання магістерської кваліфікаційної роботи.

в) *вихідні дані для виконання МКР:*

генплан підприємства (об'єкта); відомості про особливості технологічних процесів та навколишнього середовища (внутрішнього та зовнішнього); відомості про електричні навантаження підприємства (цеха, об'єкта, дільниці, приміщення); відомості про джерела живлення, їх віддаленість; графіки електричних навантажень (для діючого підприємства, енергетичного району); основні техніко-економічні показники.

## 3. ДЖЕРЕЛА РОЗРОБКИ

3.1 Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студентами спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Уклад. Л. Б. Терешкевич, О. Д. Демов, Ю. А. Шулле. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 28 с.

3.2 Правила улаштування електроустановок. - 5-те вид., переробл. й доповн. - X .: Міненерговугілля України, 2014.

3.3. М.Й. Бурбело «Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків».- Вінниця: ВНТУ, 2005р.

3.4. Демов О. Д. «Економія електроенергії на промислових підприємствах».- Вінниця: ВНТУ, 2006р.

#### 4. ЕТАПИ І ТЕРМІН ВИКОНАННЯ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Відомості про підприємство та характеристики електроприймачів.	10.09.2021	
2	Оптимізація системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод»	31.09.2021	
3	Оптимізація електричних режимів в розробленій системі електропостачання	15.10.2021	
4	Економічна частина роботи	10.11.2021	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2021	
6	Написання пояснювальної записки	10.12.2021	

#### 5. МАТЕРІАЛИ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ МКР

Пояснювальна записка МКР, графічні і ілюстровані матеріали, анотація до МКР українською та іноземною мовою.

#### 6. ПОРЯДОК КОНТРОЛЮ ВИКОНАННЯ ТА ЗАХИСТУ МКР

Робота приймається на проміжних контрольних перевірках, попередньому захисті та захисті в ДЕК.

#### 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

##### 7.1 Дані про патентоспроможність

Не передбачається

##### 8 ОЧІКУВАНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ Не передбачається

Додаток Б  
ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ  
ВИПУСКНОЇ РОБОТИ

Дані про електроспоживачів цехів підприємства наведені в таблиці Б.1.  
План підприємства, зображено на рис. Б.1.

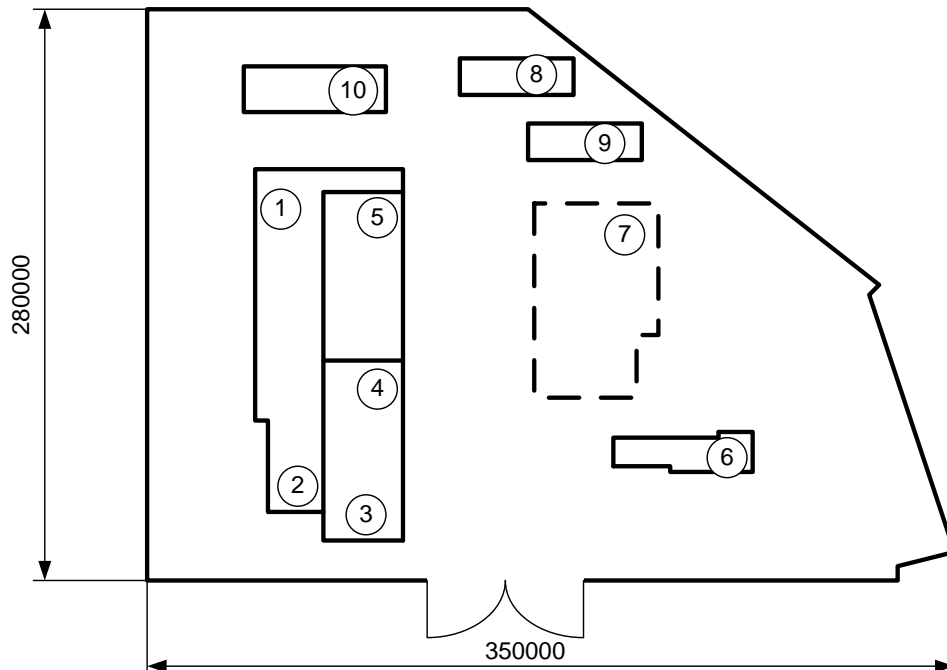


Рисунок Б.1 – План підприємства

Таблиця Б.1 – Дані про електроспоживачів підприємства

№	Найменування цехів та ділянок	Рн, кВт
1	Цех №4 (ковальсько-штампувальний цех)	260
2	Цех №5 (дрібно свердлильний цех розгорток)	150
3	Дільниця №3 (термічний цех)	400
4	Дільниця №1	200
5	Дільниця №1 1	200
6	Заводоуправління	60
7	Цехи перспективного розширення підприємства	240
8	Склад №1	10
9	Склад №2	10
10	Побутове приміщення	10
11	Субабоненти	500

За надійністю електропостачання підприємство відносяться до споживачів II категорії. Технологічне обладнання підприємства працює на електричній енергії напругою 380В промислової частоти 50 Гц.

Можливі джерела живлення:

Живлення підприємства може здійснюватись від районної трансформаторної підстанції 110/10кВ «Східна». На підстанції "Східна" встановлено два трансформатора типу ТРДН-40000У<sub>н</sub>/Д/Д-11-11. Підстанція знаходиться на віддалі 0,65 км. Енергопостачальна компанія визначає для підприємства значення вхідної реактивної потужності – 100 квар.

Додаток В  
ДЕМОНСТРАЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ ДО МКР

*Боберський Андрій Іванович*

Оптимізіція системи електропостачання  
Товариства з обмеженою  
відповідальністю «Вінницький  
інструментальний завод»

*Маістерська кваліфікаційна робота*

*Керівник:*

*Терешкевич Леонід Борисович*

*Кандидат технічних наук, професор*



*Актуальність .*

Теперішній стан системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» можна оцінити як такий, що потребує модернізації у відповідності до умов виробництва, що склались на підприємстві, та рівням розвитку проектних технологій і досконалості сучасної електротехнічної продукції.

Тому робота, в якій розробляється оптимальна система електропостачання та роботи з оптимізації параметрів її стану (моделювання задач керування батареями статичних конденсаторів (БСК) із врахуванням реальних напруг) для умов ТОВ «Вінницький інструментальний завод», слід вважати актуальною.

*Об'єкт дослідження* – система електропостачання ТОВ «Вінницький агрегатний завод».

*Предмет дослідження* – елементи схеми та електричні режими в системі електропостачання.

## МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

*Мета і завдання дослідження.* Метою роботи є оптимізація системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» та деяких параметрів її стану шляхом використання сучасних математичних методів оптимізації та інформаційних технологій для розрахунку оптимальних рішень, які стосуються оптимальної потужності трансформаторних підстанцій, оптимальних перерізів живильних та розподільних ліній підприємства, та розрахувань оптимальних потужностей конденсаторних установок із врахуванням перспективи розвитку виробництва, що дасть можливість скоротити долю енерговитрат в собівартості продукції підприємства.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі технічні задачі:

- виконати автоматизовані розрахунки оптимальних потужностей трансформаторів живильної підстанції та оптимальних перерізів ліній живлення підприємства;
- розрахувати оптимальні потужності батарей статичних конденсаторів;
- розробити методiku розрахунку оптимальних керуючих рішень з вибору секцій БСК для їх увімкнення, яка враховує дійсні значення напруг.

## Визначення оптимальної потужності ТП підприємства

*Математична модель*

$$\left\{ \begin{array}{l} Z(S_T) = (E_e + E_a) \cdot k_{\text{ТП}}(S_T, k_T) + \left[ \Delta P_{\text{ХХ}}(S_T) \cdot k_T + \Delta P_{\text{КЗ}}(S_T) \cdot \frac{S_{\text{ТП}}^2}{S_T^2 \cdot k_T} \right] \cdot t \cdot \tau \rightarrow \min_{S_T \in S_{\text{СТ}}} \\ S_T \cdot k_T \cdot k_{\text{Н}} \geq S_{\text{тп см}} \\ k_T > 1 \Rightarrow S_T \cdot k_{\text{па}} \geq S_{\text{тп р}} \cdot k_{\text{ппа}}, \\ S_T \in S_{\text{СТ}} \end{array} \right.$$

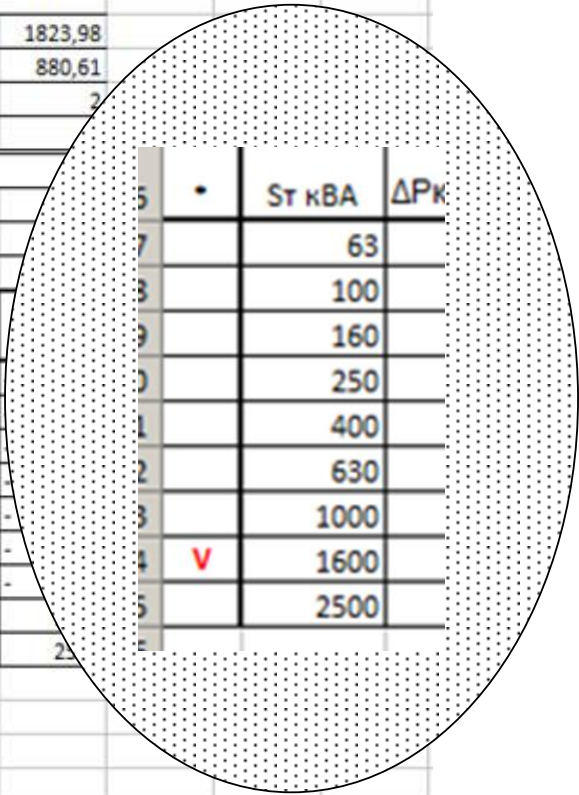
*Показник ефективності вибору трансформаторів ТП - річні приведені затрати на підстанцію*

*Керована змінна - потужність трансформаторів –  $S_T$*

*Множина доступних значень – всі стандартні потужності трансформаторів  $S_T$ .*

## Визначення оптимальної кількості та потужності цехових ТП

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Вибір оптимальної потужності ЦТП за мінімум затрат														
2	Економічні характеристики														
3	Питома вартість втрат, грн/кВт										Bo =	560,895			
4	Коефіцієнт ефективності капітоловкладень										Ee =	0,1			
5	Коефіцієнт відрахувань на амортизацію										Ea =	0,036			
6	ТП1														
7	Дані нормального режиму														
8	Розрахункова потужність ТП, кВА										Sp=	1823,98			
9	Середня потужність ТП, кВА										Sc=	880,61			
10	Кількість трансформаторів										kt=	2			
11	Допустимий коефіцієнт навантаження в н. режимі										Kn=				
12	Дані післяаварійного режиму														
13	Допустимий коефіцієнт навантаження в післяаварійному режимі										Kпа =				
14	Доля навантаження в післяаварійному режимі										Knпа =				
15															
16	*	St кВА	ΔРкз кВт	ΔРхх кВт	Ктп, тис.грн.	Е*К, тис.грн.	ΔРзм кВт	ΔРпс кВт	ΔР кВт	Вв, тис.грн.	З, тис.грн.				
17		63	1,28	0,24	95,78	13,02608	536,4621	0,48	536,9421	301,1681					
18		100	1,97	0,33	101,71	13,83256	327,6999	0,66	328,3599	184,1755					
19		160	3,1	0,51	109,45	14,8852	201,4336	1,02	202,4536	113,5552					
20		250	4,2	0,74	119,46	16,24656	111,7839	1,48	113,2639	63,52918					
21		400	5,9	0,95	143,38	19,49968	61,33977	1,9	63,23977	35,47087					
22		630	8,5	1,31	159,53	21,69608	35,62443	2,62	38,24443	21,45111					
23		1000	10,5	2,1	188,23	25,59928	17,46624	4,2	21,66624	12,15249					
24	V	1600	18	2,8	234	31,824	11,69614	5,6	17,29614	9,70132	41,52532				
25		2500	23,5	3,85	267,73	36,41128	6,254578	7,7	13,95458	7,827053	44,23833	2			
26															
27	Мінімальні затрати, грн										Зmin=	41,52532			
28	Оптимальна потужність трансформатора, кВА										St*=	1600			
29	Оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора										кз*=	0,569994			



## Розрахунок оптимального перерізу кабельних ліній

*Математична модель*

$$\left\{ \begin{array}{l} Z(x) = \left[ (E_e + E_a) \cdot K_0(x) + 3 \cdot I_L^2 \cdot r_0(x) \cdot t \cdot \tau \right] \cdot L \cdot k_L \rightarrow \min_{x \in X_{ст}} \\ x \geq x_{доп} \equiv k_{доп} \cdot I_{доп}(x) \geq I_L \\ x \geq x_{доп} \equiv k_{на} \cdot I_{доп}(x) \geq I_L \cdot k_L \cdot k_{нна} \\ \Delta U_n(x) \leq \Delta U_{доп} \\ \Delta U_{на}(x) \leq \Delta U_{доп} \\ x \geq x_{кз} = \frac{I_{кз} \cdot \sqrt{t_n}}{C} \\ x \in X_{ст} \end{array} \right.$$

*Критерій ефективності:* річні приведені затрати в зовнішню лінію живлення 10 кВ

*Керована змінна:* переріз кабельних ліній (мм<sup>2</sup>).

*Множина доступних рішень:* множина всіх стандартних перерізів кабельних ліній 10 кВ.

# Розрахунок оптимального перерізу кабельних ліній

6

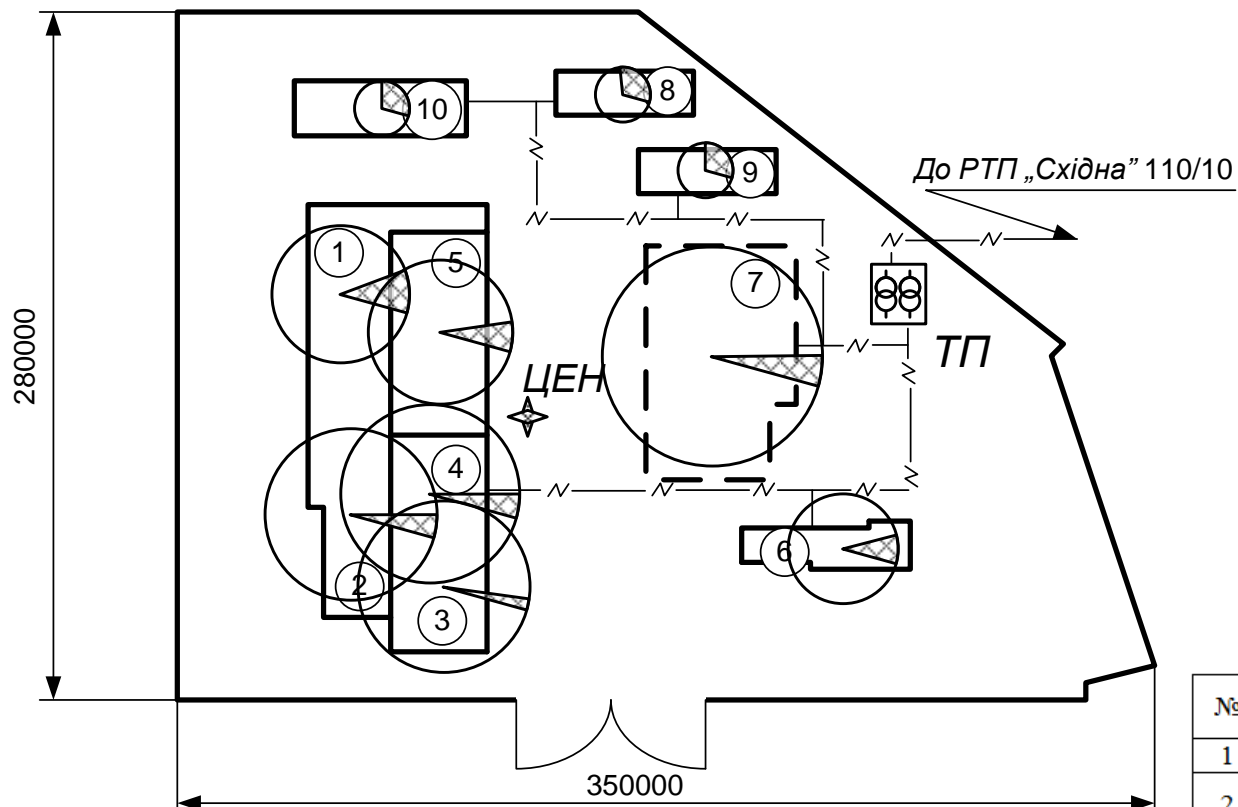
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	
1	Вибір оптимального перерізу КЛ1																			
2	Економічні характеристики																			
3	Питома вартість втрат, грн/кВт																	Bo=	560,895	
4	Коефіцієнт ефективності капіталовкладень																	Ee=	0,1	
5	Коефіцієнт відрахувань на амортизацію																	Ea=	0,04	
6	Дані нормального режиму																			
7	Напруга, кВ																	U=	10	
8	Активна розрахункова потужність споживача, кВт																	P=	1408,436	
9	Реактивна розрахункова отужність споживача, кВАр																	Q=	1278,451	
10	Розрахунковий струм окремого кабелю, А																	Ip=	54,91	
11	Коефіцієнт допустимого навантаження																	Kдоп=	0,92	
12	Допустима втрата напруги в КЛ, %																	dUдоп=	5	
13	Кількість кабелів																	k=	2	
14	Довжина лінії, км																	L=	0,5	
15	Дані аварійного режиму																			
16	Струм КЗ на початку лінії, кА																	Iкз=	5593	
17	Приведений час КЗ, с																			
18	Тепловий коефіцієнт C, (A*c^(1/2))/мм^2																			
19	Мінімальний переріз лінії за умовою КЗ, мм^2																			
20																				
21	Максимально допустимий коефіцієнт навантаження в післяаварійному режимі																			
22	Доля навантаження в післяаварійному режимі																			
23	Допустима втрата напруги в КЛ, %																			
24																				
25	F, мм^2	Ro, Ом/км	Xo, Ом/км	KO, т.грн/км	Iдоп, А	dUn, %	dUna, %	dP, кВт	K, т.грн	E*К, т.грн	Вв, т.грн	З, т.грн	X	Kдоп						
26	10	3,1	0,122	9,5381	65	1,13	1,81	28,04	9,54	1,34	15,73	-	-----	+						
27	16	1,94	0,113	13,784	75	0,72	1,15	17,55	13,78	1,93	9,84	-	-----	+						
28	25	1,24	0,099	19,854	90	0,47	0,75	11,22	19,85	2,78	6,29	-	-----	+						
29	35	0,89	0,095	25,953	115	0,34	0,55	8,05	25,95	3,63	4,52	8,15	35	+						
30	50	0,62	0,09	36,927	140	0,25	0,40	5,61	36,93	5,17	3,15	8,32	50	+						
31	70	0,443	0,086	50,501	165	0,18	0,29	4,01	50,50	7,07	2,25	9,32	70	+						
32	95	0,326	0,083	65,451	205	0,14	0,23	2,95	65,45	9,16	1,65	10,82	95	+						
33	120	0,258	0,081	82,823	240	0,12	0,19	2,33	82,82	11,60	1,31	12,90	120	+						
34	150	0,206	0,079	102,11	275	0,10	0,16	1,86	102,11	14,30	1,05	15,34	150	+						
35	185	0,167	0,077	137,48	310	0,08	0,13	1,51	137,48	19,25	0,85	20,09	185	+						
36	Мінімальні затрати, тис.грн										Змін	8,15								
37	Оптимальний переріз КЛ, мм^2										Xопт	35								

	F, мм^2	Kдоп
5	10	
6	16	
7	25	
8	35	
9	50	
10	70	
11	95	
12	120	
13	150	
14	185	



## План підприємства з електричними мережами

7



### Умовні позначення

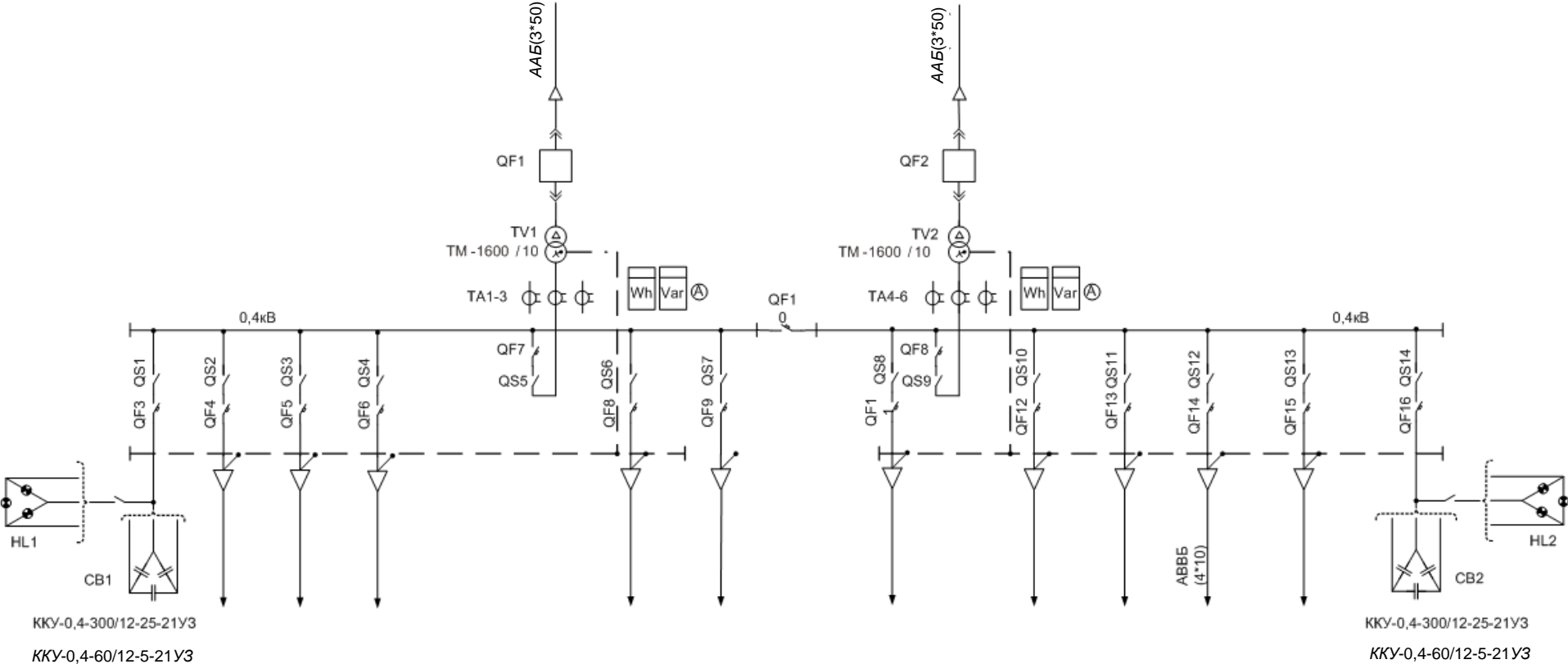
—N—N - Кабельна траншея

■ ЦЕН - Центр електричних навантажень

№	Найменування цехів та дільниць	Р <sub>н</sub> , кВт
1	Цех №4 (ковальсько-штампувальний цех)	260
2	Цех №5 (дрібно свердильний цех розгорток)	150
3	Дільниця №3 (термічний цех)	400
4	Дільниця №1	200
5	Дільниця №1 1	200
6	Заводоуправління	60
7	Цехи перспективного розширення підприємства	240
8	Склад №1	10
9	Склад №2	10
10	Побутове приміщення	10
11	Субабоненти	500



# Однолінійна схема електропостачання



## Врахування відхилення напруги при оптимальному керуванні БСК, що встановлені на підприємстві

### Залежність потужності БСК від напруги у вузлі їх під'єднання

$$Q_K = Q_H \cdot \left( \frac{U_\Phi}{U_H} \right)^2 \cdot \left( \frac{f_\Phi}{f_H} \right)$$

Частота мережі змінюється в незначних межах ( $\pm 0,2$  Гц), її впливом можна знехтувати

$$Q_K = Q_H \cdot \left( \frac{U_\Phi}{U_H} \right)^2$$

При відхиленнях напруги в межах  $\pm 5\%$  (регламентованих ГОСТ 13109-97) потужність ступенів БСК зміниться на  $\pm 10\%$ . Це може призвести до суттєвих неточностей у прийнятті рішень. Наслідком може бути прийняття недопустимих рішень або до зниження ефективності керування.

## Управління КРП в промислових мережах 0,4 кВ при нехтуванні відхиленням напруги у вузлі їх під'єднання

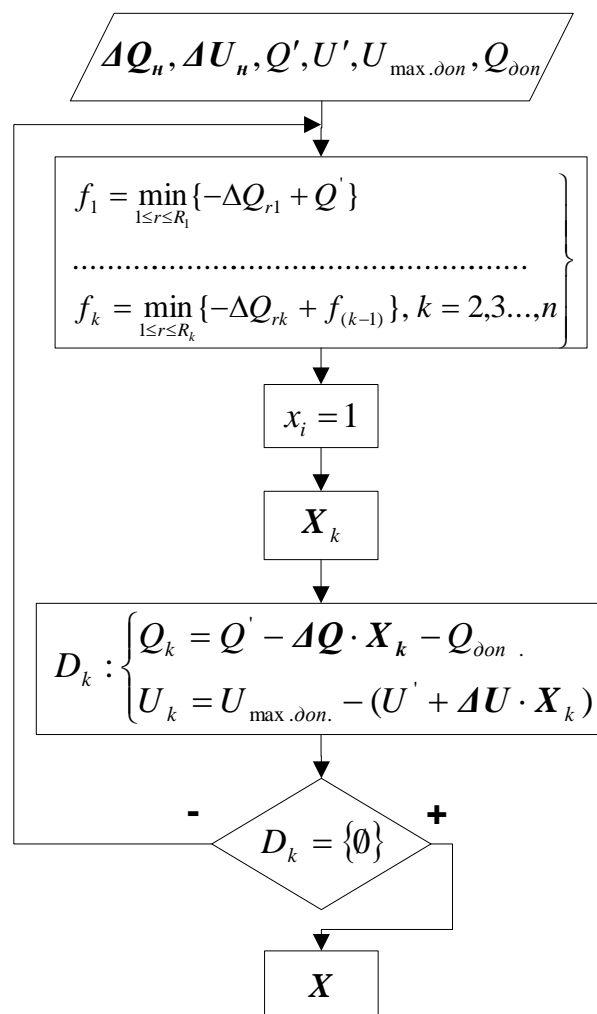
Обов'язковим і необхідним при визначенні оптимального вектора управління є одночасний контроль за обмеженнями по потужності вводу та напрузі у вузлі.

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' - \Delta Q \cdot X \rightarrow \min \\ X + \bar{X} = n \\ Q' - \Delta Q \cdot X \geq Q_{\text{доп}} . \\ U' + \Delta U \cdot X \leq U_{\text{max. доп.}} \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0. \end{array} \right.$$

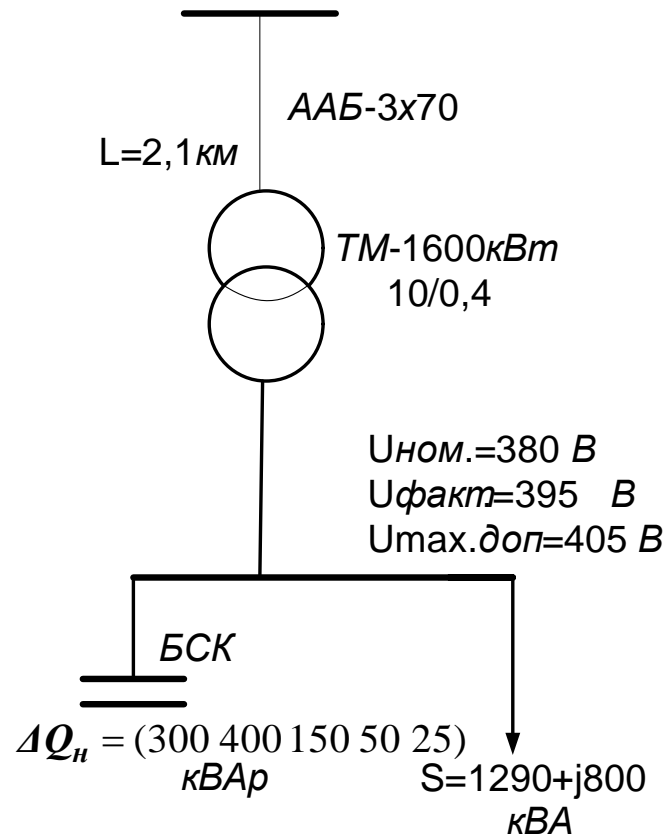
Математична модель, що забезпечує допустимі значення реактивної потужності вводу та напруги у вузлі.



**Блок схема знаходження вектора керування БСК за  
методом динамічного програмування**



## Розрахунок тестової задачі



Забезпечити мінімальні втрати активної потужності в лінії шляхом включення відповідних секцій БСК за умови, що напруга на збірних шинах не повинна перевищувати  $U_{\text{мах.доп}} = 405 \text{ В}$ . Нижнє порогове значення реактивної потужності вводу становить  $Q_{\text{доп}} = 0 \text{ квар}$ .



$$\begin{cases} 800 - (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \mathbf{X} \rightarrow \min \\ \mathbf{X} + \overline{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \\ 800 - (300 \ 400 \ 150 \ 50 \ 25) \cdot \mathbf{X} \geq 0 \\ 395 + (5,45 \ 7,26 \ 2,72 \ 0,91 \ 0,45) \cdot \mathbf{X} \leq U_{\max. \text{доп.}} \\ x_i, \overline{x}_i = 1 \forall 0 \end{cases}$$

Алг №	Оптимальний вектор керування	Сумарна потужність секцій БСК, квар		Реактивна потужність вводу, квар		Напруга на збірних шинах, В	
		Номинальна	Реальна	Що відповідає ном.потужнос-тям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК	Що відповідає ном.потужнос-тям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК
1	(0 1 1 0 0)	550	–	250	–	404,98	–

В процесі отримання результатів вважалося, що можливі післядії від ввімкнення ступенів БСК чинять незначний вплив, яким можна знехтувати.



## Математична модель, що враховує реальну потужність БСК

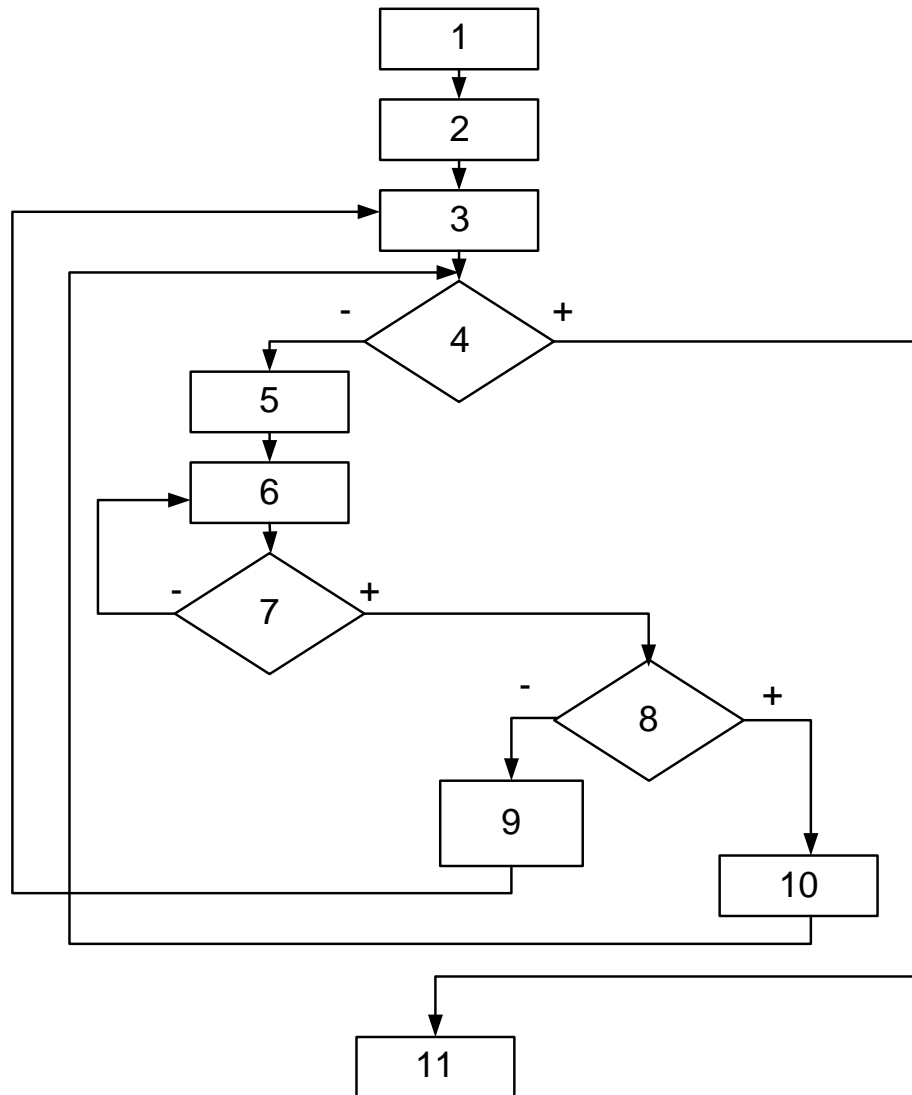
Прийняття рішення по включенню секції БСК з метою зменшення втрат активної потужності може призвести до перевищення верхньої межі відхилення напруги

$$\left\{ \begin{array}{l} Q' - \Delta Q(U) \cdot X \rightarrow \min \\ X + \bar{X} = n \\ Q' - \Delta Q(U) \cdot X \geq Q_{\text{доп}} . \\ U' + \Delta U(U) \cdot X \leq U_{\text{max, доп}} . \\ x_i, \bar{x}_i = 1 \forall 0 \end{array} \right.$$

Математична модель містить значення (елементи матриць  $\Delta Q$  та  $\Delta U$ ), що функціонально залежать від рівнів напруги, які в свою чергу залежать від реалізації результатів розв'язування задачі.



# Запропонований алгоритм аналізу розробленої математичної моделі



## Результати розрахунку вектора управління та режиму в мережі за двома алгоритмами

Алг. №	Оптималь- ний вектор керування	Сумарна потуж- ність секцій БСК, квар		Реактивна потужність вводу, квар		Напруга на збірних шинах, В		Висновок
		Номинальна	Реальна	Що відповідає ном. потужностям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК	Що відповідає ном. потужностям секцій БСК	Що відповідає реальним потужностям БСК	
1	(0 1 1 0 0)	550	629	250	171	404,98	406,41	Керування недопустиме
2	(0 1 0 1 1)	475	539	325	261	не розрах.	404,8	Керування допустиме

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. Ефективність роботи системи електропостачання, що експлуатується на ТОВ «Вінницький інструментальний завод», може бути підвищеною якщо запровадити виконані розробки.
2. Для умов ТОВ «Вінницький інструментальний завод» оптимальним варіантом за річними приведеними витратами є установка двотрансформаторної підстанції з трансформаторами потужністю 1600 кВА, а виконання живильної лінії кабелем ААБ (3\*50).
3. Суттєве зниження активних втрат в трансформаторах та в лінії живлення з одночасним забезпеченням вимог енергосистеми що до споживання реактивної потужності до шин 0,4 кВ ТП слід під'єднати комплектні БСК серії ККУ-0,4 загальною потужністю 720 квар.
4. Ефективність компенсації реактивної потужності в мережах ТОВ «Вінницький інструментальний завод» може бути підвищеною шляхом врахування реальних напруг у вузлах під'єднання БСК та прийняття оперативних рішень, використовуючи розроблену оптимізаційну математичну модель.
5. За умови, що тариф на електроенергію 3,48 грн/кВт\*год, собівартість електроенергії для ТОВ «Вінницький інструментальний завод» становить 3,53 грн/кВт\*год.

*Наукова новизна одержаних результатів.* Підвищена ефективність системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод» шляхом оптимізації потужностей трансформаторів цехових ТП, перерізів кабельних ліній та місця установки трансформаторних підстанцій, а також оптимізація одного із параметрів її стану.

*Практичне значення одержаних результатів* полягає в тому, що реалізація отриманих рішень дозволить підвищити техніко-економічну ефективність системи електропостачання ТОВ «Вінницький інструментальний завод».

