

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

на тему:

**«Розроблення системи електропостачання ковальсько-
штампувального виробництва заводу сільськогосподарського
машинобудування»**

Виконав здобувач вищої освіти

IV курсу, групи ЕЕ-22,

ОПП «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

спеціальності 141 «Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка»

_____ Валентин ЯКУШОВ

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

« ____ » _____ 2026 р.

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

_____ Петро ПЛЄШКОВ

« ____ » _____ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА
ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Якушову Валентину Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) «Розроблення системи електропостачання ковальсько-штампувального виробництва заводу сільськогосподарського машинобудування.

Development of a power supply system for a forging and stamping production plant of an agricultural machine building plant»

2. Керівник роботи (проекту) Козловський Олександр Антонович, к.т.н., доц.

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 8.06.2026 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи: Комплексне розроблення системи електропостачання ковальсько-штампувального виробництва заводу сільськогосподарського машинобудування.

1. Вступ. 2. Електричні навантаження. 3. Картограма електричних навантажень. 4. Техніко-економічне обґрунтування схем зовнішнього та внутрішнього електропостачання. 5. Компенсація реактивної потужності. 6. Трансформаторні підстанції. 7. Розрахунок струмів КЗ і вибір обладнання. 8. Спеціальний розділ. 9. Висновки. 10. Перелік посилань.

5. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальний розділ</i>	<i>доцент Н. Ю. Гарасьова</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи (проекту)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>17.04.26</i>	
2	<i>Розрахунок електричних навантажень</i>	<i>20.04.26</i>	
3	<i>Картограма електричних навантажень</i>	<i>27.04.26</i>	
4	<i>Техніко-економічне обґрунтування схеми електропостачання</i>	<i>28.04.26</i>	
5	<i>Компенсація реактивної потужності</i>	<i>1.05.26</i>	
6	<i>Трансформаторні підстанції</i>	<i>4.05.26</i>	
7	<i>Розрахунок струмів КЗ і вибір обладнання</i>	<i>6.05.26</i>	
8	<i>Спеціальний розділ</i>	<i>11.05.26</i>	
9	<i>Висновки</i>	<i>22.05.26</i>	
10	<i>Складання переліку бібліографічних посилань</i>	<i>25.05.26</i>	
11	<i>Оформлення пояснювальної записки роботи</i>	<i>26.05.26</i>	
12	<i>Оформлення слайдів (графічна частина роботи)</i>	<i>28.05.26</i>	

Дата видачі завдання

« 10 » « квітня » 2026 року

Підпис керівника

Олександр КОЗЛОВСЬКИЙ

Задання прийнято до виконання

« 10 » « квітня » 2026 року

Підпис здобувача

Валентин ЯКУШОВ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: загальний обсяг 79 с.; основний текст 75 с., 12 рис., 23 табл., 12 джерел; 1 додаток на 4 с.

Якушов, В. М. Розроблення системи електропостачання ковальсько-штампувального виробництва заводу сільськогосподарського машинобудування. – Рукопис.

Бакалаврська робота за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026 рік.

У кваліфікаційній роботі спроектовано надійну та економічно ефективну систему електропостачання ковальсько-штампувального виробництва заводу сільськогосподарського машинобудування. Визначено розрахункові електричні навантаження окремих цехів і підприємства загалом, а також побудовано добові та річні графіки електроспоживання. На основі техніко-економічного порівняння обрано оптимальну конфігурацію розподільної мережі напругою 10 кВ. Обґрунтовано необхідну потужність і місця встановлення установок компенсації реактивної потужності (на сторонах 10 кВ та 0,4 кВ), розраховано кількість і параметри трансформаторів для цехових підстанцій. За результатами розрахунку струмів короткого замикання вибрано високовольтне комутаційне обладнання, вимірювальні трансформатори та перерізи кабельних ліній 10 кВ.

У спеціальному розділі і проаналізовано перспективні напрями електрозбереження для ковальсько-штампувального виробництва. Доведено технічну та економічну доцільність інтеграції частотно-регульованого привода в систему керування пресом. Показано, що застосування перетворювача частоти дозволяє зменшити споживання електроенергії до 30%. Спираючись на ці дані, виконано практичний вибір перетворювача частоти для головного асинхронного двигуна кривошипного гаряче-штампувального преса.

Ключові слова: електропостачання виробництв, розподільна мережа 10 кВ, компенсація реактивної потужності, частотне керування, ковальсько-штампувальне обладнання, електрозбереження.

ABSTRACT

Qualification work: total volume 79 p.; main text: 75 p., 12 fig., 23 tabl., 12 references; 1 add. on 4 p.

Yakushov, V. M. Development of a power supply system for a forging and stamping production plant of an agricultural machine building plant. – Manuscript.

Bachelor's thesis in the specialisation 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", study programme 'Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics'. – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

This thesis designs a reliable and cost-effective power supply system for the forging and stamping production facilities of an agricultural machinery manufacturing plant. The design electrical loads for individual workshops and the plant as a whole have been determined, and daily and annual electricity consumption schedules have been drawn up. Based on a technical and economic comparison, the optimal configuration of the 10 kV distribution network was selected. The required capacity and installation locations for reactive power compensation units (on the 10 kV and 0.4 kV sides) were justified, and the number and parameters of transformers for workshop substations were calculated. Based on the results of short-circuit current calculations, high-voltage switchgear, instrument transformers and cross-sections of 10 kV cable lines were selected.

A special section analyses promising areas of energy saving for forging and stamping production. The technical and economic feasibility of integrating a variable-frequency drive into the press control system has been demonstrated. It is shown that the use of a frequency converter allows electricity consumption to be reduced by up to 30%. Based on these data, a practical selection of a frequency converter for the main asynchronous motor of a crank-type hot-stamping press has been carried out.

Keywords: power supply to industrial facilities, 10 kV distribution network, reactive power compensation, frequency control, forging and stamping equipment, energy saving.

ЗМІСТ

стр.

ВСТУП.....	8
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЦТВА.....	9
2. ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ.....	11
2.1. Силові навантаження в електромережі 0,4 кВ.....	11
2.2. Освітлювальні навантаження.....	14
2.3. Силові навантаження в мережі понад 1000 В.....	16
2.4. Графіки електричних навантажень.....	21
3. КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ.....	24
4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО І ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВИРОБНИЦТВА.....	27
4.1. Вибір напруги і схеми приєднання виробництва.....	27
4.2. Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання.....	28
5. РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ.....	37
5.1. Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації.....	37
5.2. Вибір кількості, потужності та місця розташування конденсаторних установок	38
6. ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ.....	40
6.1. Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій.....	40
6.2. Вибір місця розташування цехових трансформаторних підстанцій.....	42

					КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	Розроблення системи електропостачання ковальсько-штампувального виробництва заводу сільськогосподарського машинобудування Development of a power supply system for a forging and stamping production plant of an agricultural machine building plant	Літера	Стор.	Аркушів
Розроб.	Якушов В.М.					Д	6	79
Перевір.	Козловський О.А.							
Н.контр.								
Затв.	Плешков П. Г.							
						ЦНТУ гр. ЕЕ-22		

7. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ВИБІР КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ І ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	43
7.1.Розрахунок струмів КЗ у мережі 10 кВ.....	43
7.2.Вибір кабельних ліній.....	48
7.3.Вибір високовольтного електрообладнання.....	49
8. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. «ЕЛЕКТРОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОВАЛЬСЬКО-ШТАМПУВАЛЬНИХ МАШИН»....	59
8.1.Вступ.....	59
8.2.Напрями електрозбереження в ковальсько-штампувальних машинах..	60
8.3.Частотне керування приводом кривошипного преса.....	64
8.4.Частотно-регульований електропривод з асинхронними двигунами...	69
8.5.Вибір перетворювача частоти.....	71
ВИСНОВКИ.....	74
ЛІТЕРАТУРА.....	75
Додаток А. Розрахунок графіків електричних навантажень.....	76

ВСТУП

Сучасні системи електропостачання промислових підприємств мають відповідати новітнім технологіям і реальним обсягам споживання. Вони повинні гарантувати високу якість електроенергії та необхідну надійність живлення, залишаючись при цьому максимально економічно ефективними.

Технічні рішення для виконання цих вимог потрібно закладати ще на етапі проектування об'єкта. Однак це завдання ускладнюється тим, що з часом умови експлуатації часто змінюються. Наприклад, можуть зростати чи змінюватися електричні навантаження, з'являтися нові фактори з боку енергосистеми або сторонніх споживачів. Крім того, під час розробки частина вихідних даних буває лише приблизною або взагалі відсутньою.

Тому спроектована електротехнічна система має бути достатньо універсальною та гнучкою. Вона повинна легко адаптуватися до можливих змін початкових умов і обов'язково передбачати можливість свого подальшого розширення та розвитку.

Визначення оптимального рівня надійності електропостачання та енергозбереження є одним із найважливіших завдань.

Енергоощадність у таких системах насамперед передбачає зменшення втрат під час передачі, перетворення та безпосереднього споживання електроенергії. Додатково це вимагає активнішого впровадження новітніх конструктивних рішень як для окремих елементів, так і для електроустановок загалом. Під час експлуатації мереж економічну ефективність можна суттєво підвищити завдяки компенсації реактивної потужності, використанню вищих номінальних напруг та підтриманню їх на максимально допустимому рівні. Вагому роль відіграють також зниження та зміщення пікових навантажень у графіках споживання, використання екологічного та безпечного для довкілля обладнання.

Отже, під час проектування системи електропостачання промислового підприємства виділяють такі основні завдання: розрахунок електричних навантажень; раціональна передача та розподіл електроенергії; гарантування необхідної надійності живлення; забезпечення належної якості електроенергії безпосередньо на клеммах споживачів; дотримання електромагнітної сумісності електроприймачів із живильною мережею; ефективне використання та економія електроенергії.

Метою даної роботи є комплексне розроблення системи електропостачання ковальсько-штампувального виробництва заводу сільсько-господарського машинобудування.

						Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ВИРОБНИЦТВА

Ковальсько-штампувальне виробництво (КШВ) є одним зі структурних підрозділів заводу сільськогосподарського машинобудування. Загальна площа його виробничих приміщень становить близько 30 тис. кв. м. На цій території розміщено об'єкти основного виробництва: заготівельний та гарячий цехи; шихтове відділення; відділення електромашинних перетворювачів частоти. Крім того, функціонують допоміжні підрозділи: ремонтно-механічний цех, складські приміщення та адміністративно-побутові корпуси.

Щодо конструктивних особливостей будівель: адміністративний корпус та відділення електромашинних перетворювачів частоти розташовані у двоповерхових спорудах, тоді як усі інші виробничі та допоміжні підрозділи є одноповерховими.

У головних виробничих цехах найбільше електроенергії споживають ковальські молоти, штампувальні преси, а також електромашинні перетворювачі частоти (їх використовують для живлення систем індукційного нагріву металу). Натомість у допоміжному ремонтно-механічному цеху основу навантаження складають різноманітні металообробні верстати. Крім спеціалізованого устаткування, вагому частку загального споживання формують типові виробничі механізми, розміщені по всій території заводу: підйомно-транспортне обладнання (крани), потужні системи вентиляції та насосні агрегати.

Технологічний процес ковальсько-штампувального виробництва складається з кількох послідовних етапів:

1) заготівля. Зі складу в заготівельне відділення надходить металопрокат, з якого формують вихідні заготовки для майбутніх деталей культиваторів;

2) нагрівання. Отримані заготовки передають до гарячого цеху. Там їх нагрівають до необхідної температури в спеціальних електричних печах або за допомогою установок індукційного нагріву (струмами високої частоти);

3) штампування. Нагрітий метал обробляють на ковальсько-штампувальному обладнанні. Завдяки цілеспрямованому перерозподілу металу (пластичній деформації) деталь набуває заданої форми. Цей процес суттєво покращує міцнісні характеристики виробу;

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		9

4) очищення. У відділенні обробки (шихтовому/очисному) з деталей видаляють облой – надлишки металу, що утворилися після гарячого штампування.

5) доведення. Остаточна механічна обробка деталей, а також поточний ремонт самого ковальсько-пресового устаткування здійснюються в ремонтно-механічному цеху.

З точки зору електропостачання, ковальсько-штампувальне виробництво відзначається високою питомою щільністю електричних навантажень. Це зумовлено як роботою потужних пресів і нагрівачів, так і наявністю великої кількості енергоємного допоміжного обладнання, зокрема систем промислової вентиляції та насосних установок.

Виробництво працює у двозмінному режимі. Згідно з нормативними документами [1], щодо вимог до надійності електропостачання 95% електроприймачів ковальсько-штампувального цеху належать до II категорії, а решта 5% – до III категорії.

Живлення підрозділу може здійснюватися від головної знижувальної підстанції (ГЗП) машинобудівного заводу за допомогою кабельних ліній напругою 10 кВ, довжина яких становить 0,25 км.

Розрахункові значення надперехідного струму короткого замикання на шинах розподільного пристрою (РУ) 35 кВ підстанції енергосистеми становлять 8,2 кА для максимального та 5,1 кА для мінімального режимів роботи відповідно.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		10

2 ЕЛЕКТРИЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Силові навантаження в електромережі 0,4 кВ

Розрахункове активне навантаження окремої групи електроприймачів або вузла системи електропостачання визначається за виразом [3-5]:

$$P_p = P_{\text{см}} \cdot k_{\text{max}}, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{см}}$ – середнє активне навантаження групи споживачів за найбільш завантажену зміну, кВт;

k_{max} – коефіцієнт максимуму активної потужності:

$$k_{\text{max}} = \sqrt{1 + \frac{4,4 \cdot k_{\text{в}}^2 - 12,7 \cdot k_{\text{в}} + 8,235}{(k_{\text{в}} + 0,05) \cdot n_{\text{еф}}^{(1,04-0,4 \cdot K_{\text{с}})}}} \quad (2.2)$$

$k_{\text{в}}$ – груповий коефіцієнт використання відображає ступінь завантаження обладнання та обчислюється як відношення середнього споживання до встановленої потужності:

$$k_{\text{в}} = \frac{\sum_{l=1}^n P_{\text{с.зм}}}{\sum_{l=1}^n P_{\text{ном}}}, \quad (2.3)$$

$P_{\text{с.зм}}$, $P_{\text{ном}}$ – відповідно, середньозмінна активна потужність та номінальна (паспортна) потужність окремих груп електроприймачів з однаковим технологічним режимом роботи, кВт;

n – кількість таких груп у розрахунковому вузлі.

Для визначення ефективного числа електроприймачів $n_{\text{еф}}$ у групі спочатку аналізують неоднорідність їхньої потужності. Для цього знаходять співвідношення між найбільшим і найменшим за потужністю споживачем у групі:

$$m = \frac{P_{\text{ном.маx}}}{P_{\text{ном.мін}}}, \quad (2.4)$$

де $P_{\text{ном.маx}}$, $P_{\text{ном.мін}}$ – номінальні потужності відповідно найпотужнішого та найменш потужного електроприймача в аналізованій групі.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		11

Якщо в групі відношення потужностей $m \geq 3$, а коефіцієнт використання $k_b > 0,2$ то ефективну кількість електроприймачів розраховують за формулою:

$$n_{\text{еф}} = \frac{2 \sum_{i=1}^n P_{\text{ном}}}{P_{\text{ном. max}}} . \quad (2.5)$$

Отримане значення округлюють до найближчого цілого числа. Якщо розраховане $n_{\text{еф}}$ перевищує фактичну кількість обладнання n у групі, то для подальших обчислень приймають: $n_{\text{еф}} = n$.

Розрахункове реактивне навантаження групи або вузла залежить від отриманого значення ефективної кількості споживачів. Його обчислюють за такими умовами:

якщо $n_{\text{еф}} > 10$ од., тоді

$$Q_p = Q_{\text{зм}} \quad (2.6)$$

якщо $n_{\text{еф}} \leq 10$ од., тоді

$$Q_p = 1,1 \cdot Q_{\text{зм}} \quad (2.7)$$

де $Q_{\text{зм}}$ – сумарне середнє реактивне навантаження групи за найбільш завантажену зміну, квар.

Розрахунковий максимум навантаження:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} . \quad (2.8)$$

За наявності у вузлі споживачів, що працюють у повторно-короткочасному режимі (наприклад, зварювальні трансформатори, кранові двигуни), їхню паспортну потужність необхідно привести до тривалого режиму роботи. Для електродвигунів та трансформаторів це роблять за формулами:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{пасп}} \cdot \sqrt{\frac{TB, \%}{100}} ; \quad (2.9)$$

$$S_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}} \sqrt{\frac{TB, \%}{100}} , \quad (2.10)$$

де $P_{\text{пасп}}$, $S_{\text{пасп}}$ – паспортна активна (кВт) або повна (кВ·А) потужність агрегату;

TB – тривалість вмикання, виражена у відсотках.

Розрахунок електричних навантажень для електричних мереж напругою до 1000 В зведено у табл. 2.1.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						12

Таблиця 2.1. Розрахунок силових електричних навантажень в мережі 0,4 кВ КШВ

№ п/п	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кільк. ел. спо- живачів	Встановлена по- тужність, кВт		m	k _в	cosφ	tgφ	Середнє наванта- ження за зміну		n _е	k _{max}	Розрахункова потужність,		
			Одного	Сумарна					P _{ср} , кВт	Q _{ср} , квар			P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВ·А
1	Заготівельне відділення														
	Авт. листоштампувальна лінія	4	110,0 - 160,0	590,0		0,60	0,70	1,02	354,0	361,2					
	Барабан галтовочний	5	7,0 - 10,0	47,0		0,30	0,65	1,17	14,1	16,5					
	Вальці	34	12,5 - 36,0	820,0		0,20	0,65	1,17	164,0	191,7					
	Вентилятори	20	13,0 - 13,0	260,0		0,65	0,80	0,75	169,0	126,8					
	Кран ТВ=40%	14	1,4 - 19,0	83,7		0,10	0,50	1,73	8,4	14,5					
	Машина точкової зварки	6	170,0 - 240,0	1370,0		0,35	0,60	1,33	479,5	639,3					
	Металообробні верстати	15	2,2 - 21,0	147,8		0,17	0,50	1,73	25,1	43,5					
	Преси	132	8,2 - 62,0	4130,0		0,17	0,65	1,17	702,1	820,8					
	Всього	230	1,4 - 240,0	7448,5	171	0,26	0,65	1,16	1916,2	2214,3	62	1,17	2232,9	2214,3	3144,7
2	Склад штампів	8	1,9 - 5,5	33,2	3	0,49	0,74	0,90	16,2	14,7	8	1,41	22,9	16,2	28,0
3	Ремонтно-механічний цех	59	2,2 - 160,0	849,5	73	0,28	0,57	1,43	241,3	344,8	11	1,62	390,4	344,8	520,8
4	Адмінкорпус	36	0,2 - 7,5	71,4	38	0,58	0,77	0,84	41,7	34,8	19	1,16	48,2	34,8	59,5
5	Гаряче відділення КШВ	205	1,4 - 210,0	5584,9	150	0,28	0,74	0,92	1554,4	1429,9	53	1,18	1829,0	1429,9	2321,6
6	Побутові приміщення	11	1,5 - 5,5	27,5	4	0,61	0,82	0,71	16,9	12,0	10	1,23	20,7	13,1	24,5
7	Відділення шиху	71	3,5 - 47,0	693,5	13	0,22	0,60	1,35	154,9	208,5	30	1,35	208,4	208,5	294,8
8	Відділення ЕМПЧ	34	1,0 - 160,0	1291,7	160	0,70	0,80	0,75	902,6	676,9	16	1,12	1007,0	676,9	1213,3
9	Склад металу	6	10,0 - 20,0	93,0	2	0,13	0,63	1,25	11,9	14,8	6	2,72	32,3	16,3	36,1
	Всього по КШВ	660	0,2 - 240,0	16093,2	1200	0,30	0,70	1,02	4855,9	4950,7	134	1,07	5210,3	4950,7	7187,2

2.2 Освітлювальні навантаження

Освітлювальне навантаження найчастіше розраховується методом питомої потужності. Цей підхід базується на визначенні нормативної потужності ламп, необхідної для освітлення одного квадратного метра площі промислового приміщення.

Встановлена активна потужність системи освітлення обчислюється за виразом:

$$P_v = p_0 \cdot F \cdot 10^{-3}, \quad (2.11)$$

де p_0 – питома потужність освітлювального навантаження, Вт/м² (згідно з довідковими даними з [3, 5], кВт/м²;

F – загальна площа промислового приміщення, м²:

$$F = n \cdot a \cdot b, \quad (2.12)$$

n – кількість поверхів промислового приміщення;

a та b – довжина і ширина приміщення відповідно, м.

Розрахункова потужність освітлювальних електроприймачів, кВт:

$$P_p = k_1 \cdot k_n \cdot P_v \quad (2.13)$$

де k_n – коефіцієнт попиту для освітлювального навантаження;

k_1 – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати електроенергії в пускорегулювальній апаратурі (ПРА). Для світильників із люмінесцентними лампами приймають $k_1 = 1,2$, а для дугових ртутних ламп (ДРЛ) $k_1 = 1,12$.

Якщо в системі освітлення застосовуються газорозрядні джерела світла, вони споживають не лише активну, а й реактивну потужність. Її розраховують за формулою:

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.14)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ – розрахункова величина, що відповідає коефіцієнту потужності $\cos \varphi$ для конкретного типу ламп. Для люмінесцентних ламп $\cos \varphi = 0,9$, а для ламп типу ДРЛ $\cos \varphi = 0,5$.

Повне розрахункове навантаження системи освітлення обчислюється як геометрична сума активної та реактивної складових, кВт·А:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} \quad (2.15)$$

Результати розрахунку освітлювального навантаження зведені до табл. 2.2.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		14

Таблиця 2.2. Результати розрахунку освітлювального навантаження відділення

№ п/ п	Назва	n, шт	F, м ²	p ⁰ , Вт/м	cosφ	P _y , кВт	Q _y , квар	k _п	k _л	P _p , кВт	Q _p , квар	S _p , кВА
1	Заготівельне відділення	1	10080	18,0	0,5	181,4	314,3	0,95	1,12	193,1	334,4	386,1
2	Склад штампів	1	750	10,0	0,5	7,5	13,0	0,60	1,12	5,0	8,7	10,1
3	Ремонтно-механічний цех	1	2160	18,0	0,5	38,9	67,3	0,85	1,12	37,0	64,1	74,0
4	Адмінкорпус	2	1680	22,0	0,9	37,0	17,9	0,80	1,20	35,5	17,2	39,4
5	Гаряче відділення КШВ	1	7150	18,0	0,5	128,7	222,9	0,95	1,12	136,9	237,2	273,9
6	Побутові приміщення	1	540	20,0	0,9	10,8	5,2	0,80	1,20	10,4	5,0	11,5
7	Відділення шиху	1	2700	19,0	0,5	51,3	88,9	0,95	1,12	54,6	94,5	109,2
8	Відділення ЕМПЧ	2	600	15,0	0,5	9,0	15,6	0,85	1,12	8,6	14,8	17,1
9	Склад металу	1	2500	8,0	0,5	20,0	34,6	0,60	1,12	13,4	23,3	26,9
10	Освітлення території	1	34080	0,3	0,5	10,2	17,7	1,00	1,12	11,5	19,8	22,9
	Всього по КШВ					494,8	797,4			505,9	819,1	962,8

2.3 Силові навантаження в мережі понад 1000 В

При розрахунку навантажень для мереж напругою понад 1000 В основними розрахунковими вузлами виступають шини 10 кВ цехових трансформаторних підстанцій або розподільних установок. З огляду на це, ще до початку детальних обчислень визначається загальна кількість підстанцій, потужність їхніх силових трансформаторів та оптимальні місця розташування на території відділення.

Потужність трансформаторів для цехових підстанцій обирають на основі повного розрахункового навантаження. При цьому обов'язково враховують категорію споживачів щодо вимог до надійності електропостачання, а також умови компенсації реактивної потужності.

Важливо також зважати на економічну доцільність. Наприклад, якщо окремий цех має відносно невелике розрахункове навантаження (у межах 250...350 кВ·А) і розташований на відстані до 100 метрів від ТП сусіднього підрозділу, будувати для нього власну підстанцію немає сенсу. У таких випадках від однієї ТП заживляють відразу кілька цехів.

Оскільки ковальсько-штампувальне виробництво має високі вимоги до безперебійності роботи, у проєктованій системі електропостачання всі трансформаторні підстанції передбачені двотрансформаторними. Таке технічне рішення гарантує надійне резервне живлення для споживачів усіх категорій.

Вибір потужності та кількості трансформаторів, а також розрахунок навантажень і втрат електроенергії проведено, виходячи з припущення, що вся споживана реактивна потужність в мережі напругою до 1000 В компенсована.

Розрахунок електричних навантажень для мережі понад 1000 В здійснювався в такій послідовності:

1. Підсумовувалися номінальні потужності всіх силових електроприймачів (до 1000 В і вище), що живляться від конкретної підстанції (ТП).
2. Визначалися середні навантаження та груповий коефіцієнт використання.
3. Розраховувалися ефективна кількість споживачів, коефіцієнт максимуму та розрахункові силові навантаження.
4. Додавалось освітлювальне навантаження цехів.
5. Обчислювалися втрати потужності безпосередньо в силових трансформаторах.
6. Підбивався загальний підсумок середніх і розрахункових навантажень, а також втрат для кожної ТП.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		16

Втрати активної та реактивної потужності в трансформаторах визначають за формулами:

$$\Delta P = n(\Delta p_{xx} + \Delta p_{kз} \cdot k_3^2); \quad (2.16)$$

$$\Delta Q = nS_{ном} \left(\frac{i_{xx}}{100} + \frac{u_{кз}}{100} k_3^2 \right); \quad (2.17)$$

де n – кількість трансформаторів на підстанції, од.;

$\Delta p_{xx}, \Delta p_{кз}$ – втрати активної потужності відповідно холостого ходу та короткого замикання, кВт;

$S_{ном}$ – номінальна потужність цехового трансформатора, кВ·А;

i_{xx} – струм холостого ходу, %;

$u_{кз}$ – напруга короткого замикання, %;

k_3 – коефіцієнт завантаження трансформатора;

Для попередньо обраних трансформаторів ТМГ-1000-10/0,4: $\Delta p_{xx} = 1,55$ кВт, $i_{xx} = 1,2\%$; $\Delta p_{кз} = 10,8$ кВт; $u_{кз} = 5,5$

Загальне навантаження по всьому виробництву визначається за тим самим алгоритмом, що й для окремих ТП. Якщо до складу розрахункового вузла входять конденсаторні установки для підвищення коефіцієнта потужності, згенероване ними реактивне навантаження під час розрахунків враховується зі знаком мінус.

Підсумкові результати розрахунку навантажень вище 1000 В у системі електропостачання зведено в табл. 2.3.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		17

Таблиця 2.3. Розрахунок силових електричних навантажень у мережі 10 кВ

№ п/п	Назва вузлів навантаження та груп електроприймачів	Кількість ел. спо- живачів	Встановлена по- тужність, кВт		m	k _в	cosφ	tgφ	Середнє наванта- ження за змину		n _е	k _{max}	Розрахункова потужність,		
			Одного	Сумарна					P _{ср} , кВт	Q _{ср} , квар			P _р , кВт	Q _р , квар	S _р , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	ТП-1, 2 (4х1000 кВА)														
1	Заготівельне відділення														
	силове	230	1,4 - 240	7448,5	171	0,26	0,65	1,16	1916,2	2214,3	62	1,17	2232,9	2214,3	3144,7
	освітлювальне								181,4	314,3			193,1	334,4	
	Всього								2097,6	2528,6			2426,0	2548,7	3518,7
2	Склад штампів														
	силове	8	1,9 - 5,5	33,2	3	0,49	0,74	0,90	16,2	14,7	8	1,41	22,9	16,2	28,0
	освітлювальне								7,5	13,0			5,0	8,7	
	Всього								23,7	27,7			27,9	24,9	37,4
3	Ремонтно-механічний цех	59	2,2 - 160	849,5	73	0,28	0,57	1,43	241,3	344,8	11	1,62	390,4	344,8	520,8
	силове								38,9	67,3			37,0	64,1	
	освітлювальне								280,1	412,1			427,4	408,9	
	Всього по ТП-1, 2 (4х1000 кВА)														
	силове	297	1,4 - 240	8331,2	171	0,26	0,65	1,18	2173,7	2573,8	69	1,15	2497,0	2573,8	3586,0
	освітлювальне								227,8	394,6			235,1	407,2	
	батареї конденсаторів													-2400,0	
	всього												2732,1	581,0	2793,2
	втрати у трансформаторах												27,3	155,3	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-1, 2												2759,4	736,3	2855,9
	ТП-3, 4 (3х1000 кВА)														
3	Адмінкорпус														
	силове	36	0,2 - 7,5	71,4	38	0,58	0,77	0,84	41,7	34,8	19	1,16	48,2	34,8	59,5
	освітлювальне								37,0	17,9			35,5	17,2	
	Всього								78,6	52,7			83,7	52,0	98,6

Арк.

18

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
5	Паряче відділення КПШВ														
	силове	205	1,4 - 210,0	5584,9	150	0,28	0,74	0,92	1554,4	1429,9	53	1,18	1829,0	1429,9	2321,6
	освітлювальне								128,7	222,9			136,9	237,2	
	Всього								1683,1	1652,8			1965,9	1667,1	
	Всього по ТП -3, 4 (3х1000 кВА)														
	силове	241	0,2 - 210,0	5656	1050	0,28	0,74	0,92	1596,1	1464,7	54	1	1870,1	1464,7	2375,4
	освітлювальне								165,7	240,8			172,4	254,4	
	батареї конденсаторів													-1200,0	
	всього												2042,5	519,1	2107,5
	втрати у трансформаторах												20,6	117,4	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-3, 4												2063,2	636,5	2159,1
	ТП-5 (2х1000 кВА)														
6	Побутові приміщення														
	силове	11	1,5 - 5,5	27,5	4	0,61	0,82	0,71	16,9	12,0	10	1,23	20,7	13,1	24,5
	освітлювальне								10,8	5,2			10,4	5,0	
	Всього								27,7	17,2			31,1	18,2	36,0
	Відділення шиху														
7	Відділення шиху														
	силове	71	3,5 - 47	693,5	13	0,22	0,60	1,35	154,9	208,5	30	1,35	208,4	208,5	294,8
	освітлювальне								51,3	88,9			54,6	94,5	
	Всього								206,2	297,4			262,9	303,1	
	Відділення ЕМПЧ														
8	Відділення ЕМПЧ														
	силове	34	1 - 160,0	1291,7	160	0,70	0,80	0,75	902,6	676,9	16	1,12	1007,0	676,9	1213,3
	освітлювальне								9,0	15,6			8,6	14,8	
	Всього								911,6	692,5			1015,5	691,8	
	Склад металу														
9	Склад металу														
	силове	6	10 - 20	93	2	0,13	0,63	1,25	11,9	14,8	6	2,72	32,3	16,3	36,1
	освітлювальне								20,0	34,6			13,4	23,3	
	Всього								31,9	49,4			45,7	39,5	
	Освітлення території								10,2	17,7			11,5	19,8	

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Всього по ТП-5														
	силове	122	16 - 160	2105,7	10	0,52	0,77	0,84	1086,11	912,2	26	1,15	1254,3	912,2	1550,9
	освітлювальне								101,324	162,0			98,4	157,5	
	батарей конденсаторів													-750,0	
	Всього												1352,7	319,7	1390,0
	втрати у трансформаторах												13,5	81,1	
	Всього на шинах 10 кВ ТП-5												1366,2	400,8	1423,8
	Всього по ковальсько-пресовому виробництву														
	силове	660	0,2 - 240	16093,2	1200	0,30	0,70	1,02	4855,9	4950,7	134	1,07	5210,3	4950,7	7187,2
	освітлювальне								494,8	797,4			505,9	819,1	
	батарей конденсаторів 0,4 кВ													-4350,0	
	Всього								5350,7	5748,1			5716,2	1419,7	5889,9
	втрати у трансформаторах												61,4	353,8	
	Батарей конденсаторів 10 кВ Всього по													-900,0	
	КШВ на шинах 10 кВ												5777,7	873,6	5843,3

2.4 Графіки електричних навантажень

На основі типових добових графіків розробляють добові графіки активної, реактивної та повної потужностей – $P(t)$, $Q(t)$ і $S(t)$ — окремо для зимового та літнього періодів. При цьому обов'язково враховують розподіл на робочі та вихідні дні.

Типові графіки, задані у відсотках від максимуму, переводять в абсолютні одиниці (кВт та квар) для кожного часового ступеня за формулами::

$$P_j = \frac{n_{p,j}}{100} P_{max}; \quad (2.18)$$

$$Q_j = \frac{n_{q,j}}{100} Q_{max}, \quad (2.19)$$

де n_j – ордината j -го ступеня графіка навантаження, %;

P_{max} , Q_{max} – відповідні розрахункові максимуми активної та реактивної потужностей вузла.

Максимальні навантаження для робочої доби в літній період визначають за допомогою коефіцієнтів сезонності відносно зимового максимуму:

$$P_{max,л} = k_{п,р} \cdot P_{max,з} = 0.85 \cdot 577,7 = 4911,0 \text{ кВт};$$

$$Q_{max,л} = k_{п,к} \cdot Q_{max,з} = 0.85 \cdot 873,6 = 742,6 \text{ квар};$$

Повна потужність для кожного ступеня добового графіка обчислюється за виразом:

$$S_j = \sqrt{P_j^2 + Q_j^2} \text{ кВ} \cdot \text{А}. \quad (2.20)$$

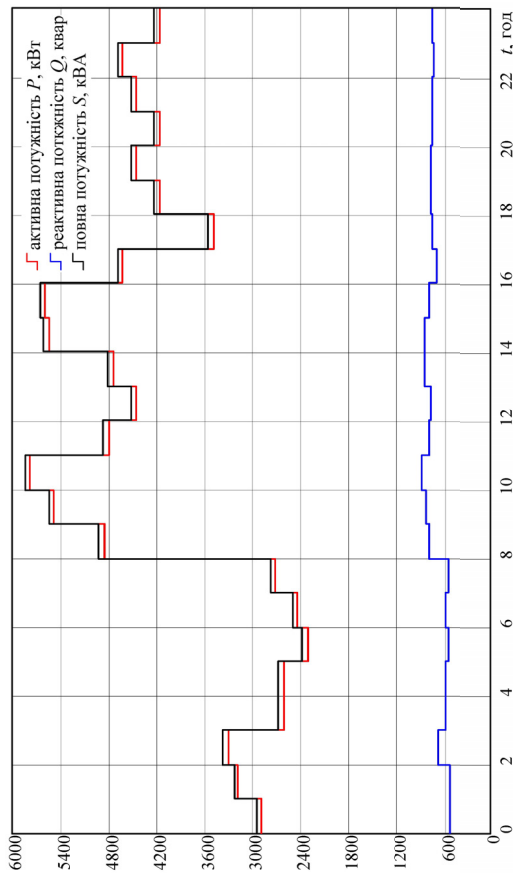
На основі добових переліків навантажень формують річний розрахунковий графік за тривалістю. Він дозволяє знайти важливі показники системи електропостачання: річне споживання активної та реактивної енергії, середньозважений коефіцієнт потужності, кількість годин використання максимуму навантаження T_{max} , а також річний час максимальних втрат τ .

Під час розрахунку річного графіка тривалість сезонів прийнята такою:

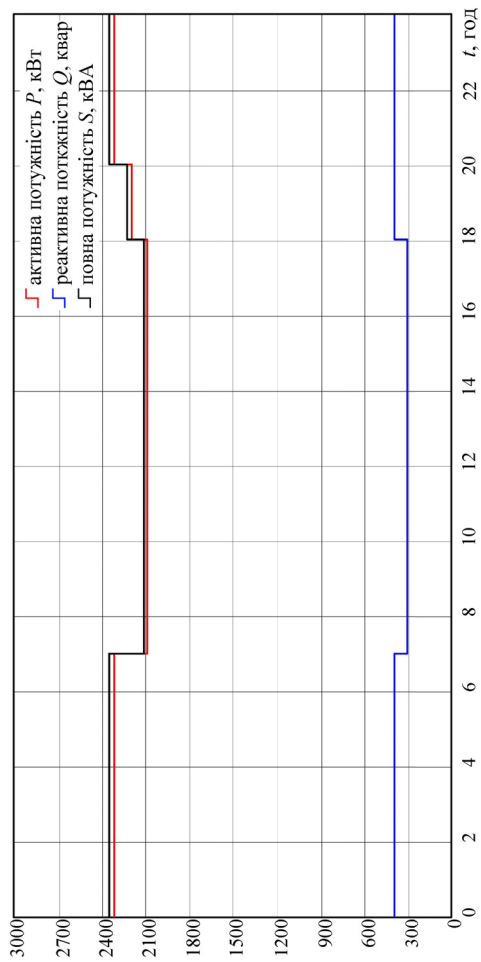
- зимовий період: 147 робочих днів та 65 вихідних;
- літній період: 105 робочих днів та 48 вихідних;

Результати обчислень добових графіків наведено в таблицях А.1–А.4 (додаток А), а самі графіки активної, реактивної та повної потужностей зображено на рис. 1. Вихідні дані та результати побудови річного графіка за тривалістю містяться в таблиці А.5 (додаток А) та на рис. 2.

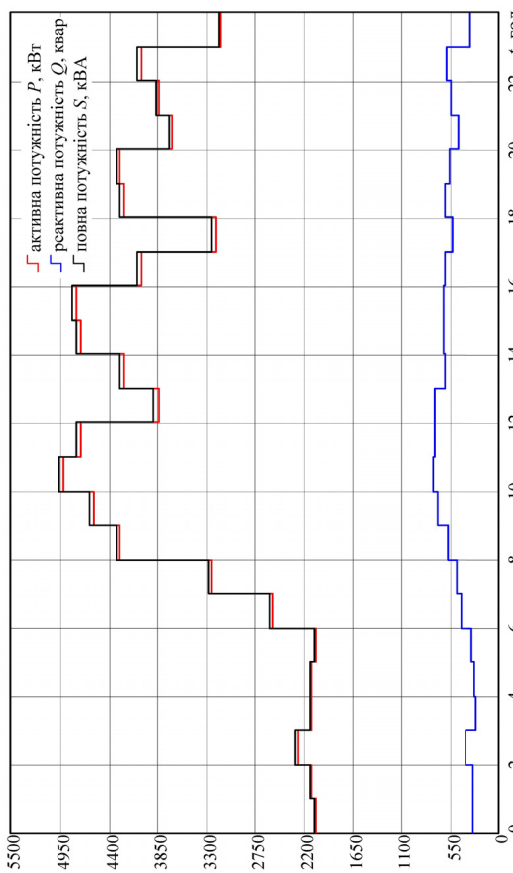
						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		21



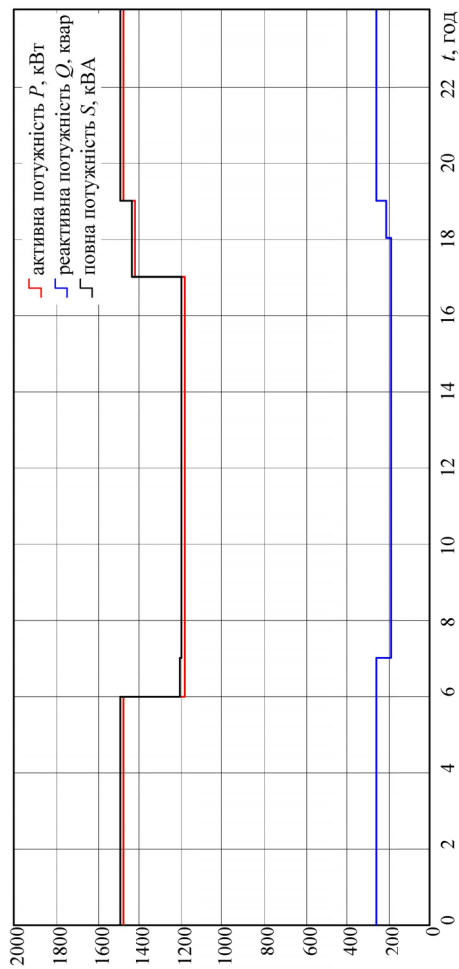
а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.1 – Добові графіки електроспоживання сторони 10 кВ ЦРУ ковальсько-штампувального виробництва:
робоча (а) та вихідна (б) зимова доба; робоча (в) і вихідна (г) літня доба

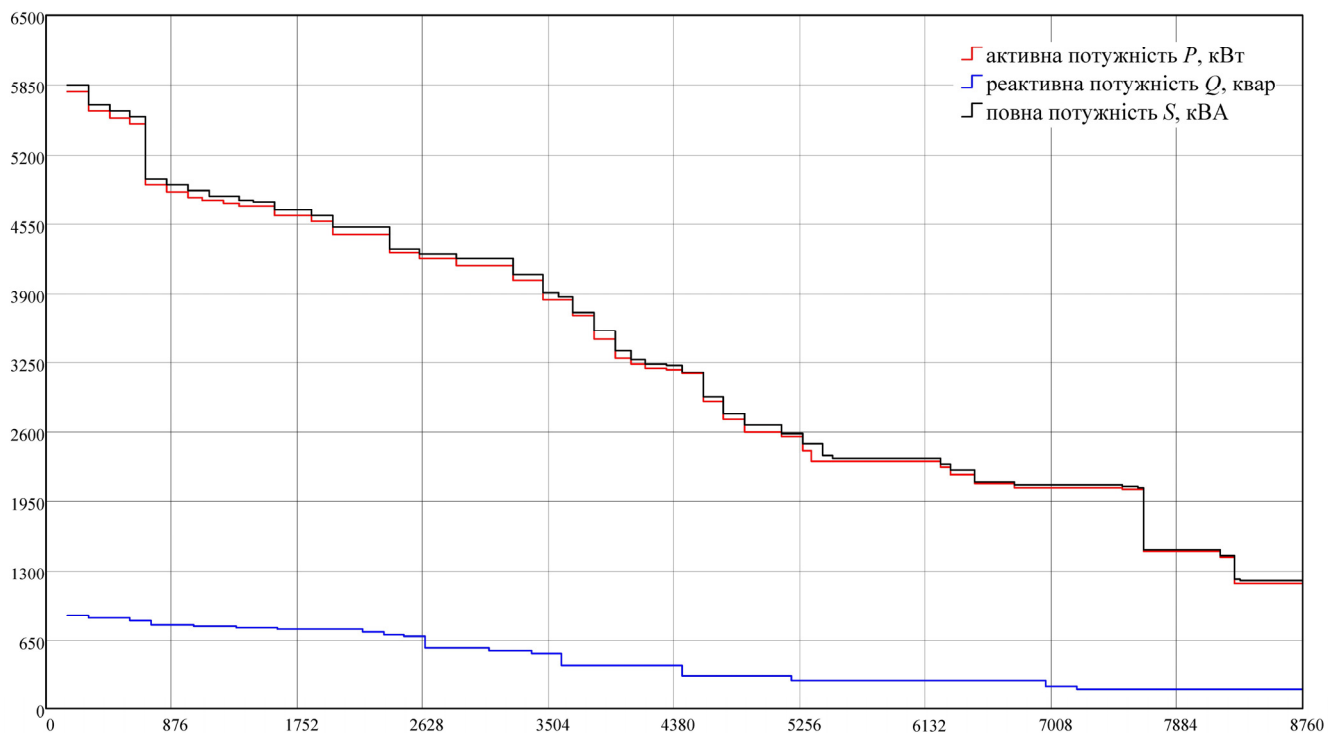


Рисунок 1.2 – Річний графік електроспоживання за тривалістю

Річні витрати активної та реактивної енергії відділення в умовах проектування визначаються шляхом інтегрування відповідних річних графіків за тривалістю:

$$W_p = \sum_{j=1}^m \left[147P_{3.p_j} + 65P_{3.B_j} + 105P_{л.p_j} + 48P_{л.B_j} \right] = 28188,8 \text{ МВт};$$

$$V_p = \sum_{j=1}^m \left[147Q_{3.p_j} + 65Q_{3.B_j} + 105Q_{л.p_j} + 48Q_{л.B_j} \right] = 4600,7 \text{ Мвар},$$

де P_j , Q_j – ординати активної (кВт) та реактивної (квар) потужності на j -му ступені річного графіка за тривалістю;

t_j – тривалість j -го ступеня, год;

m – загальна кількість ступенів річного графіка.

Число годин використання максимуму навантаження

$$T_{max} = \frac{\sqrt{W_p^2 + V_p^2}}{S_p} = \frac{\sqrt{28188,8^2 + 4600,7^2}}{5843,3} = 4887,9 \text{ год.}$$

Час максимальних втрат

$$\tau = \left[0,124 + \frac{T_{max}}{10000} \right]^2 8760 = \left[0,124 + \frac{4887,9}{10000} \right]^2 8760 = 3289,5 \text{ год.}$$

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					23

3 КАРТОГРАМА ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Для визначення оптимального місця розміщення центральної розподільної установки 10 кВ (ЦРУ) та цехових ТП на генеральний план ковальсько-штампувального виробництва наносять картограму електричних навантажень. Вона є графічним планом споживання, де кожен цех зображують у вигляді кола. Площа цього кола у вибраному масштабі відповідає розрахунковому активному навантаженню i -го підрозділу $P_{p.i}$.

Радіус кола для кожного цеху обчислюють за формулою:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_{p.сум.i}}{\pi \cdot m}} \quad (3.1)$$

де $P_{p.сум.i}$ – розрахункове активне навантаження i -го цеху, кВт;

m – масштаб для площі кола, який прийнято на рівні 0,5 кВт/мм².

Щоб наочно показати структуру споживання, всередині кожного кола виділяють сектор, який відображає частку навантаження на освітлення. Центральний кут цього сектора (α , градуси) визначають за співвідношенням:

$$\alpha_i = 360^\circ \frac{P_{осв(р).i}}{P_{p.сум.i}}. \quad (3.2)$$

де $P_{осв(р).i}$ – встановлена потужність освітлювальних електроприймачів цеху, кВт.

Усі розрахункові дані, необхідні для побудови картограми, зведено в таблицю 3.1.

Центральний розподільний пристрій найдоцільніше розміщувати в умовному центрі електричних навантажень (ЦЕН) підприємства. Координати цієї точки (x_0, y_0) на генеральному плані визначають за формулами:

$$x_0 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_{p.i} / \sum_{i=1}^n P_i; \quad (3.3)$$

$$y_0 = \sum_{i=1}^n y_i \cdot P_{p.i} / \sum_{i=1}^n P_i, \quad (3.4)$$

де n – кількість цехів ковальсько-штампувального виробництва;

x_i та y_i – координати геометричного центра i -го цеху на генплані, м;

P_i – розрахункове навантаження відповідного цеху, кВт.

						Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		

Отже, координати ЦЕН для виробництва становитимуть:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i P_{\text{сум.}i}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{сум.}i}} = \frac{22440,2 + 4324,8 + 80560 + 10164 + 350135}{2426 + 27,9 + 427,4 + 83,7 + 1965,9 +} \times \frac{8202,4 + 69470,5 + 239969,6 + 12944,5}{31,1 + 262,9 + 1015,5 + 45,7} = 159,1 \text{ м};$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i P_{\text{сум.}i}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{сум.}i}} = \frac{343760,1 + 5254,5 + 70003,9 + 2855 + 107144,1}{2426 + 27,9 + 427,4 + 83,7 + 1965,9 +} \times \frac{3790,5 + 29344,8 + 75961,6 + 4158,0}{31,1 + 262,9 + 1015,5 + 45,7} = 102,2 \text{ м}.$$

З огляду на економію кольорових металів (зменшення довжини магістральних кабелів) та зниження річних втрат енергії, розміщення ЦРУ 10 кВ у теоретичному центрі не завжди є оптимальним. Тому під час проектування його часто зміщують від теоретичного ЦЕН у напрямку зовнішнього джерела живлення [4, 5].

Для виробництва, що розглядається теоретичний центр електричних навантажень розташований у точці з координатами $x_0 = 159$ м, $y_0 = 102$ м. З урахуванням конфігурації генплану та напрямку підведення зовнішніх ліній, майданчик для будівництва ЦРУ зміщено в точку з координатами (212; 105).

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		25

Таблиця 3.1. Розрахунок картограми навантажень ковальско-штампувального виробництва

№ п/п	Назва підрозділу	Розрахункові навантаження, кВт			Радіус кола, мм	Координати центру кола, м		Градусна міра кута,	Добутки, кВт·м ²	
		P_p	P_{oc}	$P_{сум}$		x	y		$P_{сум} \cdot x$	$P_{сум} \cdot y$
1	Заготівельне відділення	2232,9	193,1	2426,0	39,3	92,5	141,7	28,6	224402,3	343760,1
2	Склад штампів	22,9	5,0	27,9	4,2	154,9	188,2	65,0	4324,8	5254,5
3	Ремонтно-механічний цех	390,4	37,0	427,4	16,5	188,5	163,8	31,2	80560,0	70003,9
4	Адмінкорпус	48,2	35,5	83,7	7,3	121,4	34,1	152,6	10164,3	2855,0
5	Гаряче відділення КШВ	1829,0	136,9	1965,9	35,4	178,1	54,5	25,1	350135,0	107144,1
6	Побутові приміщення	20,7	10,4	31,1	4,4	264	122	120,1	8202,4	3790,5
7	Відділення шиху	208,4	54,6	262,9	12,9	264,2	111,6	74,7	69470,5	29344,8
8	Відділення ЕМПЧ	1007,0	8,6	1015,5	25,4	236,3	74,8	3,0	239969,6	75961,6
9	Склад металу	32,3	13,4	45,7	5,4	283,3	91	105,9	12944,5	4158,0
	Разом			6286,2					1000173,4	642272,5

4 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СХЕМ ЗОВНІШНЬОГО І ВНУТРІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВИРОБНИЦТВА

4.1 Вибір напруги і схеми приєднання виробництва

Схему та напругу зовнішньої мережі обирають на основі техніко-економічного порівняння варіантів із урахуванням розвитку підприємства на 10 років. Основними факторами вибору є:

- наявні напруги енергосистеми в районі будівництва;
- величина та характер електричних навантажень;
- відстань до джерел живлення;
- наявність електроприймачів із номінальною напругою 6 кВ.

Зазвичай, значну частину навантаження промислових підприємств складають споживачі I та II категорій за надійністю електропостачання, їхнє живлення мають забезпечувати щонайменше дві лінії від незалежних джерел. Пропускна здатність цих ліній розраховується так, щоб у разі аварійного вимкнення однієї лінії інша (з урахуванням допустимого перевантаження) повністю забезпечувала роботу виробництва на час ліквідації аварії.

Ковальсько-штампувальне виробництво є об'єктом середньої потужності із встановленим навантаженням 16,1 МВт. На підприємстві відсутні споживачі напругою 6 кВ, а відстань до ГЗП машинобудівного заводу становить лише 0,25 км. При цьому 90% електроприймачів належать до II категорії надійності.

Для таких промислових споживачів зазвичай застосовують схеми з одним прийомним пунктом – центральною розподільною установкою. Для забезпечення надійності шини ЦРУ секціонують, а кожен секцію заживлюють від окремої лінії.

Отже, зовнішнє електропостачання ковальсько-штампувального виробництва виконується двома кабельними лініями (КЛ) напругою 10 кВ завдовжки 0,25 км від ГЗП машинобудівного заводу. Для приймання та розподілу електроенергії на його території споруджується ЦРУ. При цьому, кожна кабельна лінія за перерізом повинна пропускати всю споживану потужність виробництва, забезпечуючи стовідсотковий резерв у разі виходу з ладу одного з кабелів. Використання для схеми приєднання ліній вищого класу напруги для такої незначної відстані є економічно недоцільним.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		27

4.2 Вибір напруги і схеми внутрішнього електропостачання

Ефективність внутрішньої системи електропостачання ковальсько-штампувального виробництва суттєво залежить від правильного вибору схеми розподілу електроенергії. На промислових підприємствах такі мережі виконують за радіальною, магістральною чи змішаною схемами.

У радіальних схемах живлення цехових підстанцій та потужних споживачів здійснюється окремими кабельними лініями без проміжних відгалужень. Зазвичай застосовують схеми з числом ступенів не більше двох.

Одноступінчасті радіальні схеми використовують на малих і середніх за потужністю підприємствах для живлення зосереджених навантажень.

Головною перевагою радіальних мереж є можливість глибокого секціонування всієї системи, що підвищує безпеку та спрощує роботу релейного захисту.

Магістральний розподіл електроенергії застосовують тоді, коли споживачів багато і вони розташовані на території підприємства послідовно. Основна перевага магістралей полягає у зменшенні кількості комутаційних апаратів та економії кабелів. Кількість цехових трансформаторів, що підключаються до однієї магістралі, визначається їхньою потужністю та вимогами до надійності живлення.

Залежно від кількості ліній, розрізняють магістралі одиночні, подвійні та п-магістральні. Одиночні магістралі без резервування мають нижчу надійність, ніж радіальні схеми, тому їх використовують лише для споживачів III категорії.

Схеми з двома і більше наскрізними магістралями мають високу безперебійність і підходять для живлення споживачів будь-якої категорії [3, 4].

У реальних проектах рідко використовують системи, побудовані суто за радіальним або магістральним принципом. Найкращі техніко-економічні показники та високий рівень надійності забезпечують комбіновані схеми, які вдало поєднують переваги обох варіантів.

Для техніко-економічного аналізу системи електропостачання до розгляду прийнято два основні варіанти. В обох випадках живлення КШВ здійснюється від ГЗП машинобудівного заводу за допомогою кабельних ліній напругою 10 кВ і довжиною 0,25 км із спорудженням ЦРУ на території відділення. Відмінність полягає у схемах розподілу енергії:

Варіант 1. Передбачає використання радіальної схеми розподілу електроенергії. При цьому лінії живлення підключаються до трансформаторів цехових підстанцій за допомогою глухого приєднання (рис. 4.1).

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						28

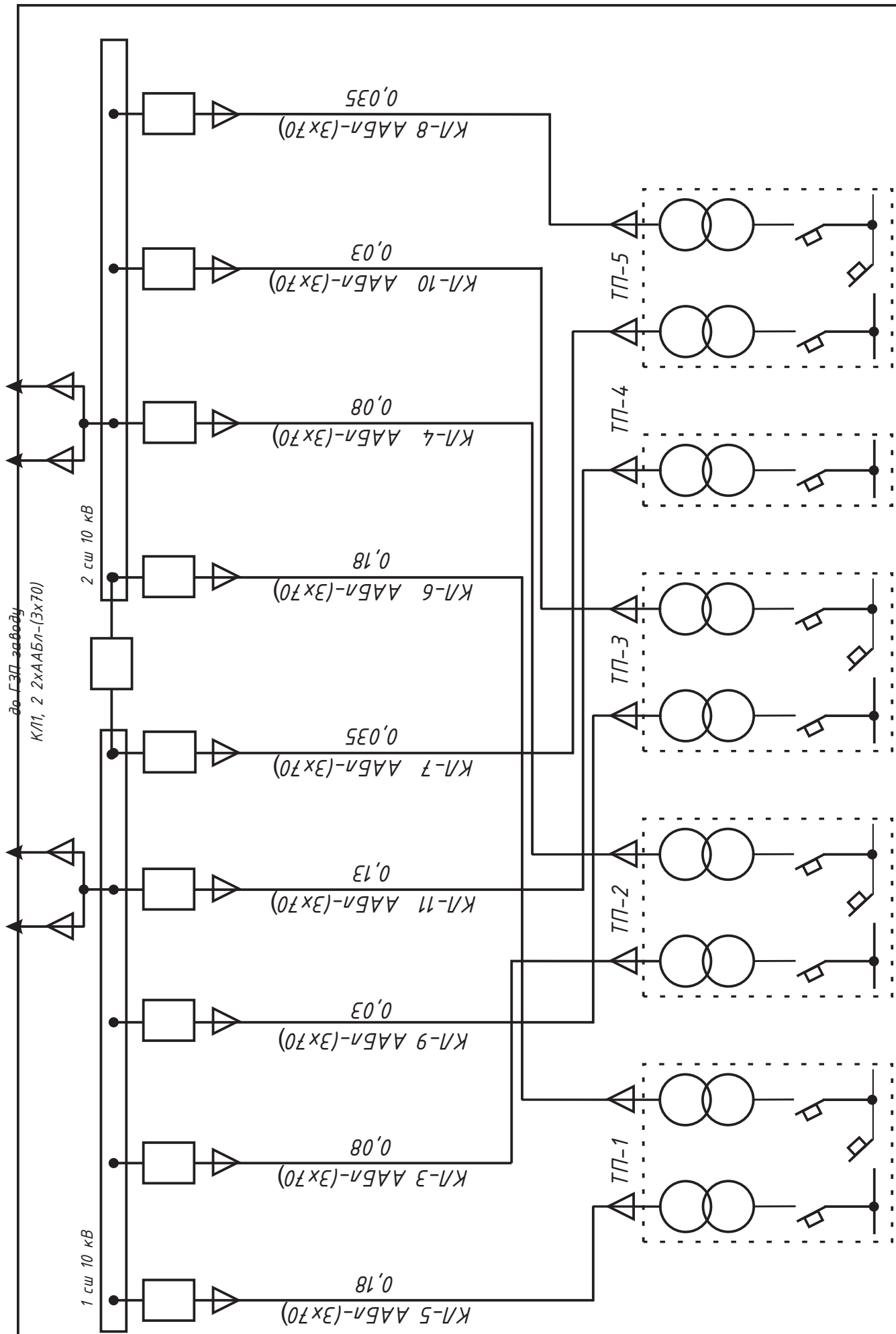


Рисунок 4.1 - Схема електропостачання за варіантом №1

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата

Арк.

29

Варіант 2. Передбачає побудову змішаної схеми. У цьому разі трансформатори ТП підключаються до ліній через вимикачі навантаження та запобіжники. Таке рішення підвищує гнучкість системи, мінімізуючи капітальні витрати та час на переобладнання під час перспективного розширення мережі або зростання потужностей (рис. 4.2).

Остаточний вибір найкращого із намічених варіантів виконується на основі порівняння їх зведених витрат.

Вибір кабельних ліній.

Розглянемо детальний порядок вибору кабельних ліній на прикладі лінії КЛ-7(8), що живить трансформаторну підстанцію ТП-5 (для варіанта №1).

Розрахункові струми для цієї ділянки становлять:

- нормальний режим:

$$I_p = \frac{S_{p.тп-5}}{n\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1423,8}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 39,2 \text{ А};$$

- аварійний режим:

$$I_{p.ав} = \frac{S_{p.тп-5}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1423,8}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 78,4 \text{ А}.$$

За величиною робочого струму для живлення ТП-5 першочергово підходить кабель марки ААБл-(3х25) із тривало допустимим струмовим навантаженням $I_{доп} = 87 \text{ А}$. Однак за умовою термічної стійкості під час короткого замикання (детальніше розписано в розділі 7) мінімальний стандартний переріз жил для цієї мережі має становити $F_{min} = 70 \text{ мм}^2$. Через це для подальшого проектування приймаємо кабель ААБл-(3х70) із каталожним допустимим струмом $I_{доп} = 162 \text{ А}$.

Допустимий струм кабелю з урахуванням конкретних умов прокладання визначається як:

$$I'_{доп} = k_{с.з} \cdot I_d = 1 \cdot 162 = 162 \text{ А},$$

де $k_{с.з}$ – коефіцієнт зниження струмового навантаження. Оскільки лінії прокладаються у повітряному кабельному каналі, цей коефіцієнт приймаємо рівним 1. Загалом при змішаному прокладанні тривалі допустимі струми завжди визначають за ділянкою траси з найгіршими умовами охолодження.

Допустимий струм кабелю в режимі ліквідації аварії (на час до 6 годин згідно з [1]) розраховують за формулою:

$$I_{доп.ав} = k_{д.а.п} \cdot I'_d = 1,25 \cdot 162 = 202,5 \text{ А},$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		30

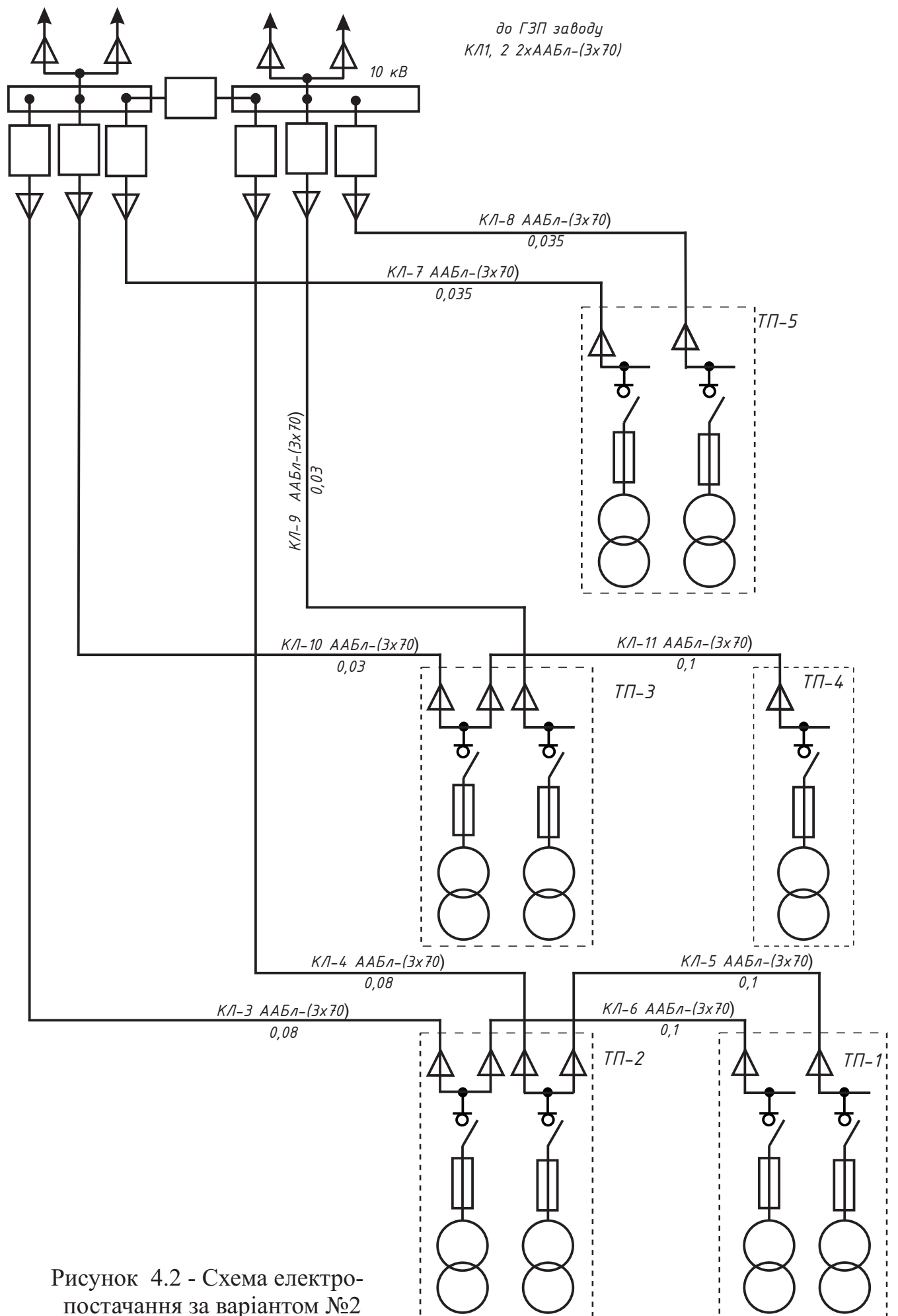


Рисунок 4.2 - Схема електропостачання за варіантом №2

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата

Арк.

31

де $k_{д.а.п}$ – коефіцієнт допустимого аварійного перевантаження. Значення 1,25 беруть за умови, що коефіцієнт завантаження лінії у нормальному режимі не перевищував 0,6:

$$k_3 = I_p / I'_{доп} = 39,2 / 162 = 0,24 < 0,6.$$

Перевірка підтверджує, що вибраний кабель ААБл-(3х70) повністю задовольняє всі умови за надійністю та пропускну здатністю в нормальному та аварійному режимах роботи СЕП.

Розрахунок інших кабельних ліній для обох варіантів аналогічний. Під час обчислень навантаження цехових підстанцій прийнято як рівномірне. Вибір інших провідників проведено у вигляді табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Вибір КЛ

№ вар	№ КЛ	№ ЕП	Тип КЛ	l , км	I_p , А	$I_{доп}$, А	$k_{с.з}$	$I'_{доп}$, А	$k_{д.а.п}$	$k_{ап}$	$I_{ав} < I_{ав.д}$, А
1	3, 4	ТП2	ААБл-(3х70)	0,080	39,3	161	0,84	135,2	1,25	2	78,6 < 169,1
	5, 6	ТП1	ААБл-(3х70)	0,180	39,3	161	0,92	148,1	1,25	2	78,6 < 185,2
	7, 8	ТП5	ААБл-(3х70)	0,035	39,2	161	1,00	161,0	1,25	2	78,4 < 201,3
	9, 10	ТП3	ААБл-(3х70)	0,030	39,6	161	1,00	161,0	1,25	2	79,2 < 201,3
	11	ТП4	ААБл-(3х70)	0,130	39,6	161	1,00	161,0	1,25	2	79,2 < 201,3
2	3, 4	ТП1, 2	ААБл-(3х70)	0,08	78,6	161	0,92	148,1	1,25	2	157,2 < 185,2
	5, 6	ТП1	ААБл-(3х70)	0,1	39,3	161	1,00	161,0	1,25	2	78,6 < 201,3
	7, 8	ТП5	ААБл-(3х70)	0,035	39,2	161	1,00	161,0	1,25	2	78,4 < 201,3
	9	ТП3, Т1	ААБл-(3х70)	0,03	39,6	161	1,00	161,0	1,25	2	79,2 < 201,3
	10	ТП3 Т2	ААБл-(3х70)	0,03	59,4	165	1,00	161,0	1,25	2	118,9 < 201,3
	11	ТП4	ААБл-(3х70)	0,1	39,6	165	1,00	161,0	1,25	1	39,6 < 201,3

Вибір схеми електропостачання

Головним критерієм вибору оптимальної схеми електропостачання промислового підприємства та його структурних підрозділів є мінімум зведених витрат.

У загальній інженерній практиці цей показник обчислюється за виразом::

$$ЗВ_1 = E_n \cdot K + C + B + З = 0,12 \cdot 5291,1 + 935,2 + 100,5 = 1670,6 \text{ тис. грн.}$$

де E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, який в енергетиці приймається рівним 0,12;

C – річні поточні витрати на експлуатацію, передачу та розподіл електроенергії, тис. грн/рік;

K – сумарні капітальні вкладення в реалізацію схеми, тис. грн;

B – річна вартість втрат електроенергії в елементах мережі, тис. грн/рік;;

Серед розглянутих варіантів внутрішнього найкращим вважається той, який забезпечує найменше підсумкове значення зведених витрат.

Загальна сума капіталовкладень за варіантами схем

Загальна сума капітальних вкладень для кожного варіанта обчислюється на основі укрупнених показників вартості всіх елементів мережі. Під час розрахунку враховують кошти на придбання силового обладнання, комутаційних апаратів і кабельної продукції, а також витрати на виконання будівельно-монтажних і пусконаладжувальних робіт.

Результати обчислень капітальних витрат для порівнюваних варіантів зведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Загальна сума капіталовкладень по варіантах

№ варіанта	Найменування елемента схеми	Од. вим.	Кількість	Вартість одиниці, тис. грн	Вартість всього, тис. грн
I	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ	шт.	9	451,2	4060,8
	Кабельна лінія ААБл-(3х70)	км	0,91	1352,0	1230,3
	Разом за вар. №1				5291,1
II	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ	шт.	6	451,2	2707,2
	Вимикач навантаження 10 кВ із запобіжником	шт.	9	34,7	312,3
	Кабельна лінія ААБл-(3х70)	км	0,650	1352,0	797,7
	Разом за вар. №2				3817,2

Розрахунок поточних витрат

Щорічні поточні витрати на утримання мережі обчислюються укрупнено і складаються з двох частин:

1) амортизаційні відрахування A – кошти, що відкладаються на майбутню заміну та відновлення обладнання через його фізичний і моральний знос;

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					33

2) витрати на експлуатацію E – кошти, які витрачаються на поточне технічне обслуговування, ремонти та підтримання устаткування в робочому стані.

Для розрахунку використовують галузеві норми амортизації H_a та експлуатаційного обслуговування H_e , які задаються у відсотках від балансової вартості обладнання. Поточні витрати для i -го елемента схеми визначаються за виразом:

$$C_i = A_i + E_i = \frac{K_i \cdot H_{a,i}}{100} + \frac{K_i \cdot H_{e,i}}{100}, \quad (4.1)$$

де K_i – капітальні вкладення в i -й елемент схеми (КЛ, лінійну шафу з вакуумним вимикачем і т.д.), тис. грн.;

$H_{a,i}$, $H_{e,i}$ – відсоткові норми відповідно амортизаційних відрахувань та експлуатаційних витрат для конкретного типу електрообладнання.

Результати обчислень щорічних поточних витрат для обох варіантів СЕП зведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3. Розрахунок поточних витрат

№ вар.	Найменування елемента схеми	Норми, %		Витрати, тис. грн.			
		$H_{a,i}$	$H_{e,i}$	K_i	A_i	E_i	C
I	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ	10,0	5,0	1360,	136,1	68,0	204,1
	Кабельна лінія ААБл-(3х70)	5,0	5,0	233,9	11,7	11,7	23,4
	Разом за вар. №1						227,5
II	Шафи КРУ з вимикачами 10 кВ	10,0	5,0	907,2	90,7	45,4	136,1
	Вимикач навантаження 10 кВ із запобіжником	10,0	5,0	222,3	22,2	11,1	33,3
	Кабельна лінія ААБл-(3х70)	5,0	5,0	151,6	7,6	7,6	15,2
	Разом за вар. №2						184,6

Вартість втрат електроенергії

Грошове вираження технологічних втрат електроенергії в елементах мережі визначається на основі діючих промислових тарифів за формулою, тис. грн.:

$$B = c_0 \cdot (\Delta E_n + \Delta E_x), \quad (4.2)$$

де c_0 – тариф на електричну енергію складає 11,129 грн/кВт·год.

Оскільки в обох варіантах схеми електропостачання використовується однакова кількість ідентичних силових трансформаторів, навантажувальні втрати в них будуть абсолютно однаковими. Тому для спрощення економічного аналізу

втрати в трансформаторах не розраховують. Також через незначну величину не враховуються втрати холостого ходу в кабельних лініях: $\Delta E_{х.кл} = 0$.

Таким чином, загальні втрати енергії в системі визначаються лише навантажувальними втратами в лініях живлення

$$\Delta E_{н.кл} = \Delta E_{кл}, \quad (4.3)$$

Річні навантажувальні втрати електроенергії в кабельних лініях (кВт·год) обчислюються через тривалість режиму максимальних втрат

$$\Delta E_{кл.i} = \Delta P_{н.кл.i} \cdot \tau_m; \quad (4.4)$$

ΔP_n – навантажувальні втрати активної потужності в і-й кабельній лінії, кВт:

$$\Delta P_{н.кл} = \Delta p_{кл.i} \cdot l_i \cdot k_3^2, \quad (4.5)$$

$\Delta p_{пл}$ – питомі втрати активної потужності у кабельних лініях при повному навантаженні, кВт/км;

k_3 – коефіцієнт завантаження лінії в нормальному режимі роботи.

Розрахунок вартості втрат електроенергії для кожного варіанта схеми зведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4. Розрахунок вартості втрат електроенергії за варіантами

№ вар	Назва ЕП	Номер КЛ	Тип лінії	Δp , кВт/км	k_3	l_{Σ} , км	ΔP , кВт	ΔE , кВт·год	B , грн
I	Кабельна лінія	3, 4	ААБл-(3х70)	44	0,29	0,160	0,59	1956,1	5191,6
		5, 6	ААБл-(3х70)	44	0,27	0,360	1,12	3669,1	9737,9
		7, 8	ААБл-(3х70)	44	0,24	0,070	0,18	600,3	1593,4
		9, 10	ААБл-(3х70)	44	0,25	0,060	0,16	525,9	1395,8
		11	ААБл-(3х70)	44	0,25	0,260	0,69	2279,0	6048,6
Всього						0,91		9030,5	23967,3
II	Кабельна лінія	3, 4	ААБл(3х70)	44	0,53	0,160	1,98	6522,8	17311,8
		5, 6	ААБл(3х70)	44	0,24	0,200	0,52	1725,3	4579,0
		7, 8	ААБл(3х70)	44	0,24	0,070	0,18	600,3	1593,4
		9	ААБл(3х70)	44	0,25	0,030	0,08	263,0	697,9
		10	ААБл(3х70)	44	0,37	0,030	0,18	591,7	1570,3
		11	ААБл(3х70)	44	0,25	0,100	0,27	876,5	2326,4
Всього						0,59		10579,6	28078,8

Підсумкові результати техніко-економічного порівняння та обґрунтування запропонованих варіантів схем зовнішнього і внутрішнього електропостачання ковальсько-штампувального виробництва зведено в табл. 4.5.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		35

Таблиця 4.5. Техніко-економічні показники варіантів схеми внутрішнього електропостачання

Показники	Од. вим.	Варіант	
		1	2
Капіталовкладення	тис. грн.	5291,1	3817,2
Поточні витрати	тис. грн. /рік	935,2	683,7
Вартість втрат електроенергії	тис. грн. /рік	100,5	117,7
Приведені витрати	тис. грн. /рік	1670,6	1259,5

Проводимо порівняння приведених витрат за варіантами:

$$ЗВ_1 = 1670,6 > ЗВ_2 = 1259,5 \text{ тис. грн.};$$

Аналіз результатів свідчить, що другий варіант забезпечує вищу економічну ефективність. Завдяки оптимізації комутаційної апаратури та впровадженню гнучкішої структури розподілу енергії, зведені витрати для Варіанта №2 є суттєво нижчими, ніж для Варіанта №1.

До подальшої розробки приймається схема внутрішньозаводського електропостачання ковальсько-штампувального виробництва за Варіантом №2.

5 РЕЖИМИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

5.1 Розрахунок балансу реактивної потужності та вибір пристроїв для її компенсації

Сумарне активне та реактивне навантаження в мережі напругою до 1000 В (на шинах цехових трансформаторних підстанцій) становить:

$$P_{\text{н}} = \sum P_{\text{тп.і}} = 2732,1 + 2042,5 + 1352,7 = 6127,3 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{н}} = \sum Q_{\text{тп.і}} = 2981,0 + 1719,1 + 1069,7 = 5769,7 \text{ квар.}$$

Загальне споживання електроенергії підприємством обчислюється з урахуванням втрат.

Розрахункове навантаження активної потужності:

$$P_{\text{р}} = P_{\text{в}} + P_{\text{н}} + \Delta P_{\text{тр}} = 0 + 6127,3 + 59,1 = 6186,4 \text{ кВт},$$

де $P_{\text{в}}$ – високовольтне навантаження;

$\Delta P_{\text{тр}}$ – сумарні втрати активної потужності в цехових трансформаторах:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \sum \Delta P_{\text{тр.і}} = 26,4 + 19,7 + 13,0 = 59,1 \text{ кВт};$$

Розрахункове навантаження реактивної потужності:

$$Q_{\text{р}} = Q_{\text{в}} + Q_{\text{н}} + \Delta Q_{\text{тр}} = 0 + 5769,7 + 337,4 = 6107,2 \text{ квар};$$

де $Q_{\text{в}}$ – високовольтне навантаження;

$\Delta Q_{\text{тр}}$ – сумарні втрати реактивної потужності в цехових трансформаторах:

$$\Delta Q_{\text{тр}} = \sum \Delta Q_{\text{тр.і}} = 150,6 + 112,5 + 74,3 = 337,4 \text{ квар.}$$

Економічно доцільна реактивна потужність, яку вигідно споживати безпосередньо з енергосистеми:

$$Q_{\text{с}} = P_{\text{р}} \cdot \text{tg}\varphi_{\text{св}} = 6186,4 \cdot 0,15 = 928 \text{ квар.}$$

Визначимо мінімальну кількість силових трансформаторів, необхідних для надійного живлення споживачів:

$$N = P_{\text{н}} / (k_{\text{з}} \cdot S_{\text{т.ном}}) = 6127,3 / (0,7 \cdot 1000) = 8,8 \text{ од.},$$

де $k_{\text{з}} = 0,7$ – оптимальний коефіцієнт завантаження трансформаторів (згідно з табл. 2.3).

Округляємо отримане значення до найближчого більшого цілого числа й приймаємо до встановлення $N = 9$ шт.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		37

Реактивна потужність, яку можна передати з високовольтної мережі 10 кВ у низьковольтну мережу 0,4 кВ через цехові трансформатори без їхнього перевантаження:

$$Q_1 = \sqrt{(n \cdot S_T \cdot k_3)^2 - P_n^2} = \sqrt{(9 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 6127,3^2} = 1464,8 \text{ квар.}$$

Необхідну реактивну потужність КУ для встановлення в мережі 0,4 кВ знаходимо з умови балансу реактивної потужності на шинах підстанцій:

$$Q_{\text{ку.нн}} = Q_n - Q_1 = 6127,3 - 1464,8 = 4305 \text{ квар.}$$

Обираємо стандартну потужність низьковольтних конденсаторних установок $Q_{\text{ку.нн}} = 4350$ (2х600, 5х400 квар).

Після вибору стандартних номіналів коригуємо значення потужності, що надходить із мережі:

$$Q_1 = Q_n - Q_{\text{ку.нн}} = 6127,3 - 4350 = 1419,7 \text{ квар.}$$

Необхідна потужність конденсаторних установок для встановлення в мережі високої напруги 10 кВ:

$$Q_{\text{ку.вн}} = Q_p - Q_{\text{ку.нн}} - Q_e = 6107,2 - 4305 - 928 = 829,2 \text{ квар.}$$

Приймаємо до встановлення стандартну високовольтну конденсаторну батарею потужністю $Q_{\text{ку.вн}} = 900$ квар (2х450 квар).

5.2 Вибір кількості, потужності та місця розташування конденсаторних установок

Місце підключення конденсаторних установок у низьковольтних мережах відділення залежить від конфігурації мережі, розподілу навантажень та режимів роботи електрообладнання. Вибір потужності конденсаторних установок для кожної цехової трансформаторної підстанції виконується за наступною методикою.

Спочатку визначають надлишкову реактивну потужність, яку необхідно компенсувати безпосередньо на шинах НН (0,4 кВ) конкретної підстанції (наприклад, ТП-5). Розрахунок базується на різниці між фактичним реактивним навантаженням цеху та тією частиною потужності, яку технічно можливо отримати з мережі ВН (10 кВ) без перевантаження трансформатора:

$$Q_{\text{ку.нн}} = Q_n - Q_1 = 1069,7 - 360,8 = 708,8 \text{ квар.}$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		38

де Q_1 – гранична реактивна потужність, яка може бути передана через силові обладнання підстанції під час нормальної роботи.

$$Q_1 = \sqrt{(n \cdot S_{\text{т.ном}} \cdot k_3)^2 - P_{\text{н}}^2} = \sqrt{(2 \cdot 1000 \cdot 0,7)^2 - 1352,7^2} = 360,8 \text{ квар.}$$

На основі розрахункового значення $Q_{\text{ку}}$ за каталогом вибираємо найближчу більшу стандартну потужність КУ $Q_{\text{ку}} = 750$ квар. Оскільки, на ТП-5 встановлено два трансформатори то приймаємо до встановлення 2 шт. – УКРМ-0,4-400-1-10.

Для забезпечення гнучкого ступеня регулювання та надійності схеми цю потужність доцільно розподілити на два окремі модулі автоматичного регулювання. Відтак, обираємо дві установки типу УКРМ-0,4-400-1-10.

Розрахунки для решти цехових підстанцій виконуються за аналогічним інженерним підходом. Усі отримані результати обчислень, технічні характеристики вибраного обладнання та місця його підключення систематизовано і зведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Вибір кількості, потужності та місця встановлення КУ 0,4 кВ

№ ТП	$N_{\text{тр, од}}$	$P_{\text{р, кВт}}$	$Q_{\text{р, квар}}$	$Q_1, \text{квар}$	$Q_{\text{кп, квар}}$	$N_{\text{ку}}$	Тип КУ	$\Sigma Q_{\text{бк, квар}}$	$S, \text{кВА}$	$k_{3,д}$
1, 2	4	2732,1	2981,0	612,8	2368,1	4	УКРМ-0,4-600-1-12	2400,0	2793,2	0,698
3, 4	3	2042,5	1719,1	487,9	1231,2	3	УКРМ-0,4-400-1-10	1200,0	2107,5	0,702
5	2	1352,7	1069,7	360,8	708,8	2	УКРМ-0,4-400-1-10	750,0	1390,0	0,695
Разом		6127,3	5769,7	1461,6	4308,2			4350		

6. ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ

6.1 Вибір кількості та потужності трансформаторів цехових трансформаторних підстанцій

Для надійного розподілу електроенергії в мережах 10 кВ ковальсько-штампувального виробництва в більшості цехів проектування передбачає встановлення двотрансформаторних цехових підстанцій. Таке рішення обґрунтовано такими чинниками:

- наявність споживачів II категорії за надійністю електропостачання, що потребують резервування живлення;
- висока концентрація та значна зосередженість електричних навантажень на обмеженій площі цехів;
- двозмінний режим роботи виробництва, який обмежує час для планового обслуговування обладнання;
- відсутність складського та централізованого резерву силових трансформаторів на підприємстві;
- необхідність забезпечення високої якості напруги при роботі потужного ударного та пресового обладнання, що супроводжується різкозмінними навантаженнями.

Кількість і одинична потужність трансформаторів є взаємопов'язаними величинами. При сталому розрахунковому навантаженні S_p кількість трансформаторів безпосередньо залежить від обраного їх номіналу. Для попереднього визначення кількості трансформаторів використовуються наступні рекомендовані коефіцієнти завантаження k_z у нормальному режимі:

- 0,65–0,7 – для цехів із переважним навантаженням I категорії при використанні двотрансформаторних ТП;
- 0,7–0,8 – для цехів із переважним навантаженням II категорії при застосуванні однострансформаторних ТП із магістральним або кабельним взаємним резервуванням.

Для КШВ попередньо прийнято 5 підстанцій із загальною кількістю трансформаторів 9 од. та одиничною потужністю 1000 кВ·А.

Перевірку правильності вибору потужності та кількості агрегатів виконаємо методом питомої густини навантаження. Спочатку визначимо питому густину навантаження S_{Π} на одиницю виробничої площі F :

$$S_{\Pi} = S_p / F = 5843,3 / 28160 = 0,2 \text{ кВ} \cdot \text{А} / \text{м}^2.$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		40

Згідно з інженерними методиками, значенню $S_{\Pi} \leq 0,2 \text{ кВ}\cdot\text{А/м}^2$ відповідає економічно доцільна номінальна потужність трансформатора $S_{\text{с.ном}} = 1000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$.

Розрахункова кількість трансформаторів за цим методом становить

$$N_{\text{тр}} = S_{\text{р}} / (k_{\text{з.тр}}/S_{\text{н.с}}) = 5843,3 / (0,7 \cdot 1000) = 8,3 \text{ од.}$$

Округлюємо отримане значення до найближчого більшого цілого числа $N = 9$ од, що підтверджує правильність попереднього вибору потужністю по 1000 кВ·А.

Детальний розподіл, вибір та перевірку обладнання по кожній ТП наведено в табл. 6.1. До встановлення прийнято сучасні герметичні трансформатори серії ТМГ-1000/10/0,4. Перевірка показала, що з урахуванням допустимого аварійного перевантаження в разі відключення одного з трансформаторів, споживачі надійно забезпечені живленням.

Таблиця 6.1. Вибір трансформаторів ЦТП

№ ТП	Назва споживача	Категорія ЕП за безпечністю електропостачання	$S_{\text{р}}, \text{кВт}$	$k_{\text{з.д}}$	$k_{\text{з.ав}}$	$S_{\text{р.т}}, \text{кВА}$	Кількість та тип трансформаторів, кВА	k_{Π}	$S_{\text{т.ном}} \cdot k_{\Pi} > S_{\text{ав.р}};$
1, 2	Заготівельне відділення	II							
	Склад штампів	III							
	Ремонтно-механічний цех	II							
	Всього по ТП-1, 2		2793,2	0,70	1,40	698,3	4хТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 > 1394,3
3, 4	Адмінкорпус	III							
	Гаряче відділення КШВ	II							
	Всього по ТП-3, 4		2107,5	1,05	2,11	1053,7	3хТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 > 1307
5	Побутові приміщення	II							
	Відділення шиху	II							
	Відділення ЕМПЧ	II							
	Склад металу	III							
	Всього по ТП-5		1390,0	0,69	1,39	695,0	2хТМГ-1000/10/0,4	1,4	1400 > 1350,7

6.2 Вибір місця розташування цехових трансформаторних підстанцій

Електропостачання цехів заводів зазвичай реалізують на базі комплектних трансформаторних підстанцій (КТП). Їхнє просторове розміщення є однією з найважливіших інженерних задач, яка вирішується з урахуванням величини й характеру електричних навантажень, конфігурації виробничих зон та генерального плану підприємства.

За архітектурно-конструктивним виконанням та відношенням до головної будівлі цеху підстанції поділяють на такі види:

- окремо розташовані (окремі) ТП - зводяться як самостійні споруди на певній відстані від промислових корпусів;
- прибудовані ТП – безпосередньо примикають до зовнішньої стіни виробничої будівлі, маючи з нею щонайменше одну спільну конструктивну стіну, при цьому самі апаратні приміщення розташовані ззовні;
- вбудовані ТП – закриті підстанції, які інтегруються безпосередньо в контур будівлі. Їхні зовнішні стіни збігаються з периметром цеху, але обслуговування та доступ до обладнання зазвичай здійснюються з внутрішнього боку або через спеціально передбачені ізольовані виходи;
- внутрішньоцехові (внутрішні) ТП – повністю розташовуються всередині виробничих приміщень, на відкритих або вигороджених майданчиках;

Для максимального наближення джерел живлення до потужних електроприймачів напругою 0,4 кВ підстанції намагаються зміщувати вглиб виробничих зон – ближче до ЦЕН. Такий підхід мінімізує довжину низьковольтних кабельних ліній, що істотно знижує капітальні витрати на кольоровий метал, а також зменшує технологічні втрати електроенергії в мережі.

У цехах ковальсько-штампувального виробництва встановлюють одно- або двотрансформаторні КТП внутрішнього розміщення. Компонувальні рішення для кожної внутрішньоцехової підстанції розробляють індивідуально. При цьому детально аналізують будівельні та експлуатаційні обмеження, розташування технологічних ліній, траєкторії руху вантажопідйомних механізмів, параметри навколишнього середовища (запиленість, вологість, температура), умови природного охолодження трансформаторів, а також жорсткі вимоги пожежної та електричної безпеки.

Зокрема, у заготівельному відділенні проектом передбачено раціональне використання простору: щоб не займати корисну площу в зоні дії мостових кранів (підкранові майданчики), підстанцію ТП-1 змонтовано в міжколонному просторі, а ТП-2 – поблизу допоміжних технологічних приміщень у «мертвій зоні» роботи кранових механізмів. Аналогічні безпечні та економічно виправдані планувальні підходи застосовані для розміщення підстанцій у гарячому штампувальному відділенні та відділенні шихти.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						42

7 РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ ВИБІР КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ І ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

7.1 Розрахунок струмів КЗ у мережі 10 кВ

Для визначення струмів короткого замикання складено вихідну розрахункову схему І-ї секції шин системи електропостачання ковальсько-штампувального виробництва (рис. 7.1). Розрахунок виконується в системі відносних базисних одиниць.

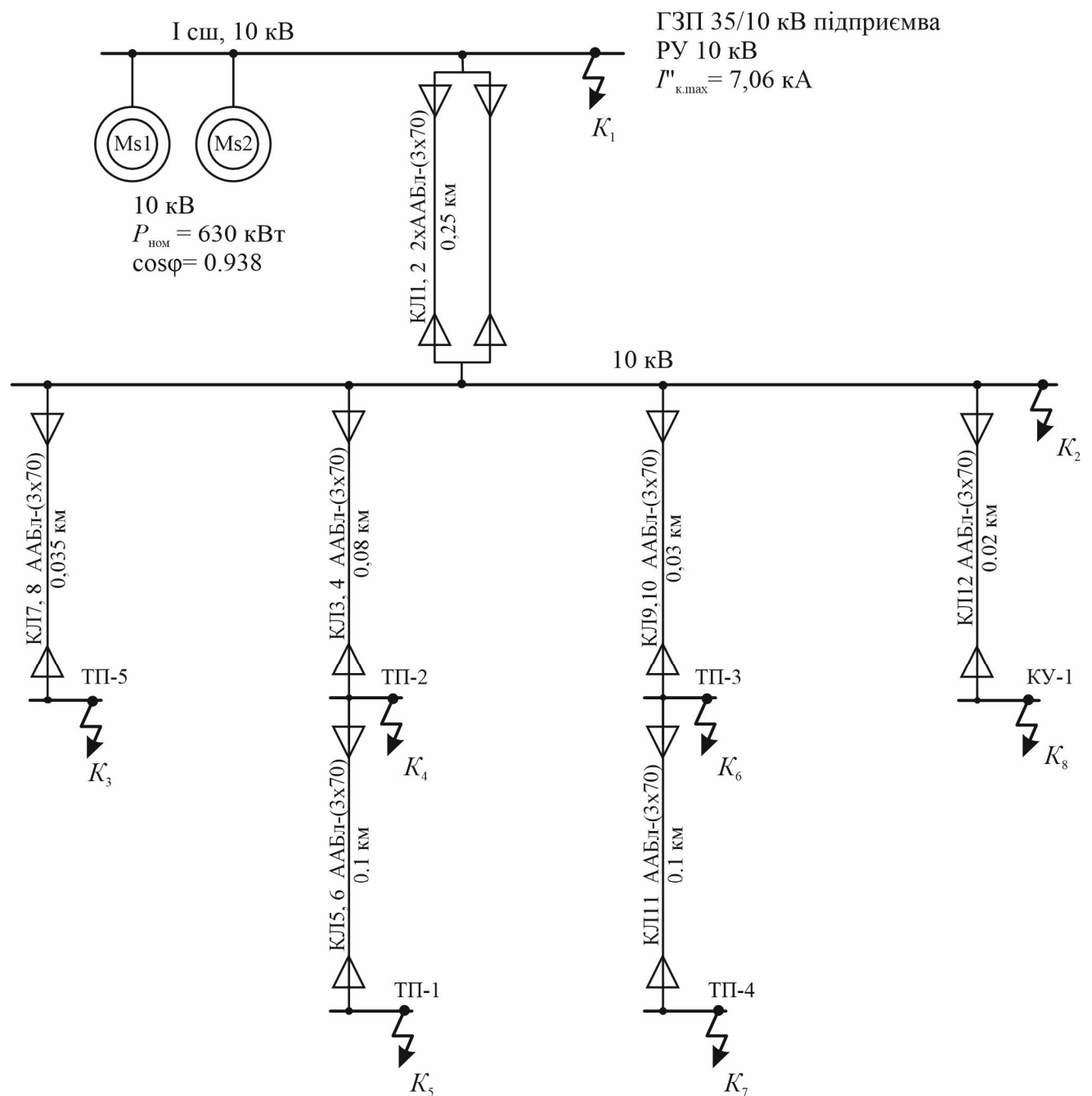


Рисунок 7.1 – Розрахункова схема СЕП КШВ

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	43

Детальний покроковий розрахунок струмів КЗ наведено для магістральної лінії КЛ-3 у максимальному режимі роботи енергосистеми. Для решти ліній та вузлів мережі розрахунок аналогічний і виконаний у вигляді таблиці 7.1.

Задаємо вихідні базисні умови для розрахунку:

- базисна потужність $S_6 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А};$
- базисний струм становитиме $U_6 = 10,5 \text{ кВ}.$

Тоді значення базисного струму на цьому ступені напруги становить:

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3}U_6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 55 \text{ кА};$$

Визначимо параметри елементів схеми заміщення у відносних одиницях:

- живлячої системи:

$$r_{c*} = 0,479 \text{ в.о.};$$

$$x_{c*} = \frac{S_6}{\sqrt{3}I_{\text{кз.с.мах}} \cdot U_{\text{ср}}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,642 \cdot 10,5} = 8,278 \text{ в.о.};$$

- кабельних ліній:

КЛ-1:

$$r_{\text{кл1}*} = \frac{r_0}{2} l_{\text{кл1}} \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = \frac{0,443}{2} \cdot 0,25 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,502 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{кл1}*} = \frac{x_0}{2} l_{\text{кл1}} \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = \frac{0,086}{2} \cdot 0,25 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,098 \text{ в.о.};$$

КЛ-3:

$$r_{\text{кл3}*} = \frac{r_0}{2} l_{\text{кл3}} \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = 0,443 \cdot 0,08 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,321 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{кл3}*} = x_0 l_{\text{кл3}} \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = 0,086 \cdot 0,08 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,062 \text{ в.о.};$$

КЛ-5:

$$r_{\text{кл5}*} = r_0 l_{\text{кл5}} \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = 0,44 \cdot 0,1 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,402 \text{ в.о.};$$

$$x_{\text{кл5}*} = x_0 l_{\text{кл5}} \frac{S_6}{U_{\text{ср}}^2} = 0,086 \cdot 0,1 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 0,078 \text{ в.о.};$$

На основі розрахункової схеми та обчислених опорів складаємо схему заміщення (рис. 7.2).

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		44

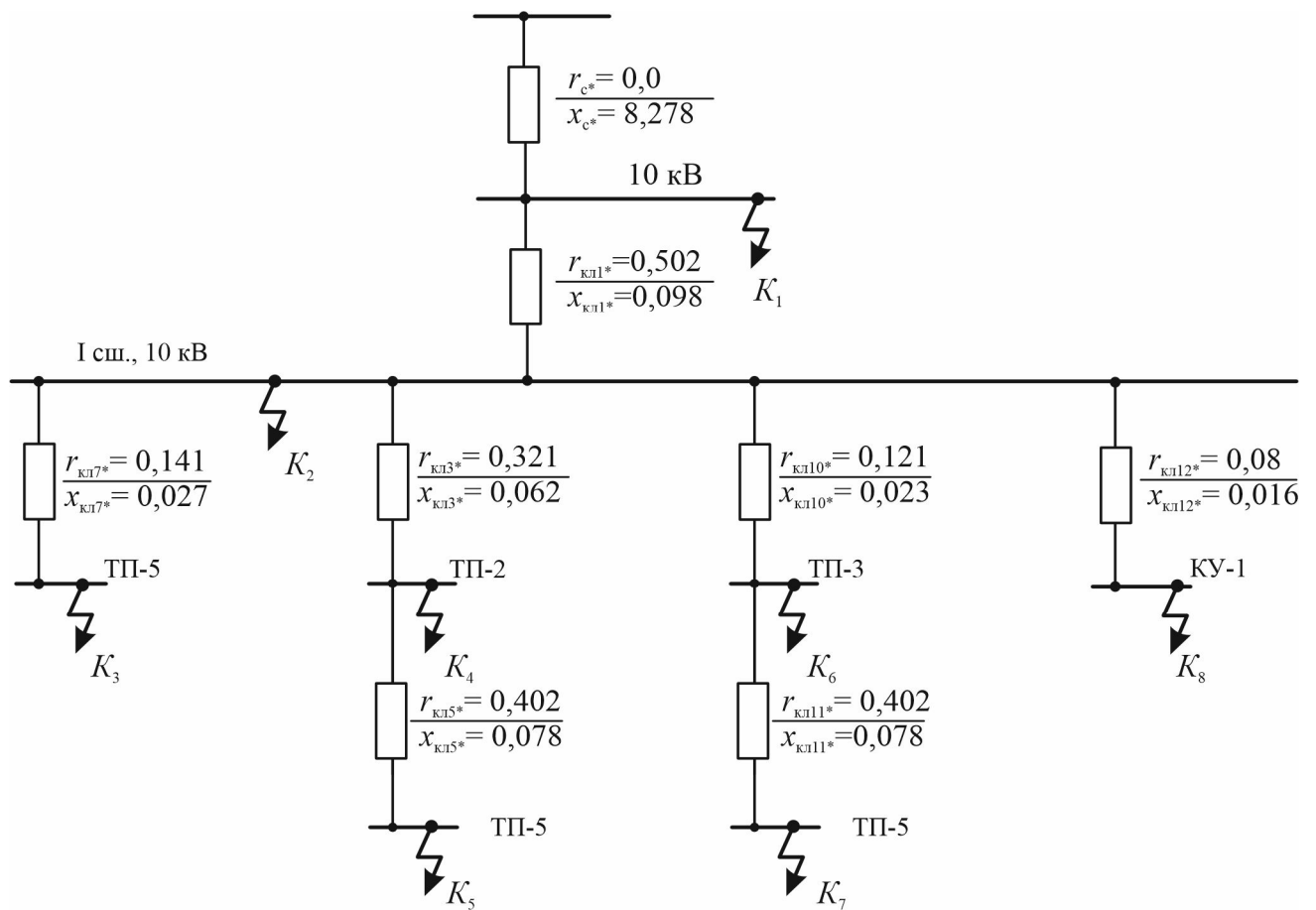


Рисунок 7.2 – Схема заміщення СЕП КШВ (I сш, ЦРУ 10 кВ)

Результуючий опір у колі точки КЗ:

- точка K_1 :

$$r_{рез1*} = r_{c*} = 0,479 \text{ в.о.};$$

$$x_{рез1*} = x_{c*} = 8,278 \text{ в.о.};$$

- точка K_2 :

$$r_{рез2*} = r_{рез1*} + r_{кл1*} = 0,479 + 0,502 = 0,981 \text{ в.о.};$$

$$x_{рез2*} = x_{рез1*} + x_{кл1*} = 8,278 + 0,098 = 8,376 \text{ в.о.};$$

$$z_{рез2*} = \sqrt{r_{рез2*}^2 + x_{рез2*}^2} = \sqrt{0,981^2 + 8,376^2} = 8,433 \text{ в.о.};$$

- точка K_4 :

$$r_{рез4*} = r_{рез2*} + r_{кл3*} = 0,981 + 0,321 = 1,303 \text{ в.о.};$$

$$x_{рез4*} = x_{рез2*} + x_{кл3} = 8,376 + 0,062 = 8,438 \text{ в.о.};$$

$$z_{рез4*} = \sqrt{r_{рез4*}^2 + x_{рез4*}^2} = \sqrt{1,303^2 + 8,438^2} = 8,538 \text{ в.о.};$$

- точка K_5 :

$$r_{рез5*} = r_{рез4*} + r_{кл5*} = 1,303 + 0,402 = 1,704 \text{ в.о.};$$

$$x_{рез5*} = x_{рез4*} + x_{кл5} = 8,438 + 0,078 = 8,516 \text{ в.о.};$$

$$z_{рез5*} = \sqrt{r_{рез5*}^2 + x_{рез5*}^2} = \sqrt{1,704^2 + 8,516^2} = 8,685 \text{ в.о.}$$

Надперехідний струм створюваний енергосистемою:

$$I_2'' = \frac{E_*'' \cdot I_{6II}}{z_{рез2*}} = \frac{1 \cdot 55}{8,433} = 6,52 \text{ кА};$$

$$I_4'' = \frac{E_*'' \cdot I_{6II}}{z_{рез4*}} = \frac{1 \cdot 55}{8,538} = 6,44 \text{ кА};$$

$$I_5'' = \frac{E_*'' \cdot I_{6II}}{z_{рез5*}} = \frac{1 \cdot 55}{8,685} = 6,33 \text{ кА};$$

де E_*'' – надперехідна ЕРС, приймаємо згідно [6, 7] $E_*'' = 1$.

Ударні струми створювані системою:

$$i_{уд2} = \sqrt{2} k_{уд2} \cdot I_2'' = \sqrt{2} \cdot 1,692 \cdot 6,52 = 15,0 \text{ кА};$$

$$i_{уд4} = \sqrt{2} k_{уд4} \cdot I_4'' = \sqrt{2} \cdot 1,616 \cdot 6,44 = 14,7 \text{ кА};$$

$$i_{уд5} = \sqrt{2} k_{уд5} \cdot I_5'' = \sqrt{2} \cdot 1,616 \cdot 6,33 = 13,73 \text{ кА}.$$

де $k_{уд}$ – ударні коефіцієнти:

$$k_{уд2} = 1 + e^{(-0,01/T_{a2})} = 1 + e^{(-0,01/0,0272)} = 1,692;$$

$$k_{уд4} = 1 + e^{(-0,01/T_{a4})} = 1 + e^{(-0,01/0,0206)} = 1,616;$$

$$k_{уд5} = 1 + e^{(-0,01/T_{a5})} = 1 + e^{(-0,01/0,0159)} = 1,533,$$

T_a – стала часу затухання аперіодичної складової струму КЗ:

$$T_{a2} = \frac{x_{рез2}}{\omega \cdot r_{рез2}} = \frac{8,376}{314,16 \cdot 0,981} = 0,0272 \text{ с};$$

$$T_{a4} = \frac{x_{рез4}}{\omega \cdot r_{рез4}} = \frac{8,438}{314,16 \cdot 1,303} = 0,0206 \text{ с};$$

$$T_{a5} = \frac{x_{рез5}}{\omega \cdot r_{рез5}} = \frac{8,516}{314,16 \cdot 1,704} = 0,0159 \text{ с}.$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		46

Початкове значення періодичної складової струму КЗ від СД:

$$I''_{ms} = \frac{n \cdot E''_{ms} \cdot I_2}{x''_{ms}} = \frac{2 \cdot 1,1 \cdot 0,043}{0,225} = 0,42 \text{ кА};$$

де n – кількість синхронних двигунів; E''_{ms} – надперехідна ЕРС синхронного двигуна (згідно з довідковими даними [6, 7] приймаємо $E''_{ms} = 1,1$).

Ударний коефіцієнт для електродвигунів визначаємо за кривими згасання, наведеними в [6, 7], що становить $k_{уд} = 1,9$. Тоді ударний струм у точці КЗ, зумовлений підживленням від синхронних двигунів, дорівнює:

$$i_{уд.ms} = \sqrt{2} k_{уд.ms} \cdot I''_{ms} = \sqrt{2} \cdot 1,9 \cdot 0,42 = 1,13 \text{ кА}.$$

Сумарні струми КЗ у відповідних розрахункових точках:

$$I''_{2\Sigma} = I''_2 + I''_{сд} = 6,52 + 0,42 = 6,94 \text{ кА};$$

$$I''_{4\Sigma} = I''_4 + I''_{сд} = 6,44 + 0,42 = 6,86 \text{ кА};$$

$$I''_{5\Sigma} = I''_5 + I''_{сд} = 6,33 + 0,42 = 6,76 \text{ кА};$$

$$i_{2,уд\Sigma} = i_2 + i_{уд.ms} = 15,0 + 1,14 = 16,74 \text{ кА};$$

$$i_{4,уд\Sigma} = i_4 + i_{уд.ms} = 14,7 + 1,14 = 15,85 \text{ кА};$$

$$i_{5,уд\Sigma} = i_5 + i_{уд.ms} = 13,73 + 1,14 = 14,86 \text{ кА}.$$

Таблиця 7.1. Розрахунок струмів КЗ у максимальному режимі роботи СЕП

Точка КЗ	r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	I , км	$r_{кл}$, в.о.	$x_{кл}$, в.о.	$r_{рез}$, в.о.	$x_{рез}$, в.о.	$z_{рез}$, в.о.	T_a , с	k_y	I'' , кА	$i_{уд}$, кА	I''_{Σ} , кА	$i_{уд,\Sigma}$, кА
K_1	—	—	—	—	—	0,479	8,278	8,292	0,0550	1,834	6,63	17,20	7,06	18,33
K_2	0,2215	0,043	0,250	0,502	0,098	0,981	8,376	8,433	0,0272	1,692	6,52	15,60	6,94	16,74
K_3	0,443	0,086	0,035	0,141	0,027	1,122	8,403	8,478	0,0238	1,657	6,49	15,20	6,91	16,34
K_4	0,443	0,086	0,080	0,321	0,062	1,303	8,438	8,538	0,0206	1,616	6,44	14,71	6,86	15,85
K_5	0,443	0,086	0,100	0,402	0,078	1,704	8,516	8,685	0,0159	1,533	6,33	13,73	6,76	14,86
K_6	0,443	0,086	0,030	0,121	0,023	1,102	8,399	8,471	0,0243	1,662	6,49	15,26	6,92	16,40
K_7	0,443	0,086	0,100	0,402	0,078	1,504	8,477	8,610	0,0179	1,573	6,39	14,21	6,81	15,34
K_8	0,443	0,086	0,020	0,080	0,016	1,062	8,392	8,458	0,0252	1,672	6,50	15,37	6,92	16,51

7.2 Вибір кабельних ліній

Виконаємо детальний вибір кабельних ліній КЛ-1(2), призначених для живлення центрального розподільного пункту (ЦРП) 10 кВ підприємства від підстанції енергосистеми.

Розрахункові струми ліній визначаються для двох режимів роботи:

- нормального

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{5843,3}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 160,8 \text{ А};$$

- післяаварійного:

$$I_{ав} = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{5843,3}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 321,7 \text{ А},$$

де n – кількість паралельних кабельних ліній.

Попередньо з довідника вибираємо силовий кабель із алюмінієвими жилами марки ААБл. Зважаючи на величину навантаження, приймаємо дві паралельні лінії, кожна з яких складається з двох кабелів перерізом $3 \times 70 \text{ мм}^2$. Тривало допустимий струм для такого перерізу становить $I_{доп} = 2 \times 162 = 324 \text{ А}$.

Перевіримо правильність вибору перерізу за технічними критеріями:

- допустимим струмовим навантаженням у нормальному режимі:

$$I_p \leq I'_{доп} = k_{п} \cdot I_{доп};$$

$$160,8 \leq 0,84 \cdot 324 = 272,2 \text{ А};$$

де $k_{п}$ – поправочний коефіцієнт, що враховує зниження струмової спроможності через сумісне прокладання кількох кабелів поруч в одній траншеї, приймаємо 0,84 згідно з [1] для 4-х поруч прокладених кабелів;

- за умовою роботи в післяаварійному режимі:

$$I_{ав} \leq k_{п} \cdot k_{ав} \cdot I_{доп};$$

$$321,7 < 0,84 \cdot 1,25 \cdot 324 = 340,2 \text{ А};$$

$k_{ав}$ – коефіцієнт допустимого аварійного перевантаження кабелю на період усунення пошкодження (до 6 годин на добу впродовж не більше 5 діб відповідно до [1]).

Застосування такого коефіцієнта є коректним, оскільки коефіцієнт попереднього завантаження менший за граничне значення 0,6:

$$k_з = I_p / I'_{доп} = 160,8 / 272,2 = 0,58 < 0,6.$$

Таким чином, для надійного живлення виробництва остаточно приймаємо до прокладання чотири кабелі марки ААБл-(3х70).

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	
					48

Мінімально допустимий переріз жил кабелів КЛ-1(2) за умовою термічної стійкості до струмів короткого замикання становить:

$$q_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \sqrt{127,5 \cdot 1000} = 120,1 \text{ мм}^2;$$

де C – функціональний коефіцієнт, що враховує матеріал жил та ізоляції кабелю, згідно з [8, 9] для алюмінієвих жил приймаємо 100, $\text{А} \cdot \text{с}^{0.5}/\text{мм}^2$;

B_k – тепловий імпульс струму КЗ, який визначається за формулою:

$$B_k = I_{\text{п.о}}^2 (t_{\text{відк}} + T_a) = 7,06^2 \cdot (2,042 + 0,055) = 104,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Оскільки фактичний сумарний переріз двох паралельних кабелів у лінії становить $2 \times 70 = 140 \text{ мм}^2$, що значно перевищує мінімально розраховане значення $q_{\min}$, вибраний переріз повністю задовольняє умову термічної стійкості. Остаточно приймаємо лінії до прокладання.

Попередній вибір марок, типу захисних оболонки та перерізу жил кабельних ліній, що забезпечують живлення цехових ТП, за критеріями економічної густини струму та тривало допустимого струмового навантаження виконано в р. 4.2 (див. табл. 4.1). Зважаючи на це, подальший розрахунок полягає в обов'язковій перевірці обраних ліній на термічну стійкість під час протікання струмів короткого замикання.

Мінімально допустимий за умовою термічної стійкості переріз жил для кабельних ліній, підключених до шин ЦРУ, визначається за виразом:

$$F_{\min} = \frac{1}{C} \sqrt{B_k} = \frac{1}{94} \cdot \sqrt{27,45 \cdot 1000} = 55,7 \text{ мм}^2;$$

$$B_k = I_{\text{п.о}}^2 (t_{\text{відк}} + T_a) = 6,94^2 \cdot (0,542 + 0,0272) = 55,7 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Отже, найменший переріз кабелів 10 кВ у системі електропостачання ковальсько-штампувального виробництва 70 кв. мм.

7.3 Вибір високовольтного електрообладнання

Вибір та перевірка високовольтних комутаційних апаратів і захисного обладнання виконується шляхом зіставлення розрахункових параметрів електричної мережі з паспортними (каталожними) даними заводу-виробника.

Розрахунок ведеться за такими технічними критеріями:

- номінальною напругою

$$U_{\text{уст}} < U_{\text{ном}}; \quad (7.1)$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						49

- номінальним струмом

$$I_p < I_{\text{вим.ном}}; \quad (7.2)$$

- струмом аварійного режиму

$$I_{\text{ав}} < I_{\text{вим.ном}}; \quad (7.3)$$

- відключаючою здатністю симетричного струму відключення:

$$I_{\text{пт}} < I_{\text{вим.н}}; \quad (7.4)$$

- здатністю вимикання за симетричним струмом:

$$i_{\text{ат}} < i_{\text{а.ном}} = \sqrt{2} \frac{\beta_{\text{н}}}{100\%} \cdot I_{\text{вим.н}}; \quad (7.5)$$

якщо умова (7.4) не виконується то можливо проводити перевірку вимикаючої здатності за повним струмом КЗ

$$\left(\sqrt{2} I_{\text{пт}} + i_{\text{ат}} \right) < \sqrt{2} I_{\text{вим.н}} \left(1 + \frac{\beta_{\text{н}}}{100\%} \right); \quad (7.6)$$

- електродинамічною стійкістю

$$I_{\text{п.0}} < I_{\text{дин}}; \quad (7.7)$$

$$i_{\text{уд}} < i_{\text{дин}} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot I_{\text{дин}}; \quad (7.8)$$

- термічною стійкістю

$$B_{\text{к}} < I_{\text{н.т}}^2 \cdot t_{\text{т.н}}. \quad (7.9)$$

Для наочності та зручності аналізу результати вибору обладнання оформлюють у вигляді порівняльних таблиць. У лівій частині таких таблиць зазначають фактичні розрахункові параметри мережі, а в правій — відповідні технічні характеристики обладнання з каталогів виробників. Електроапарат вважається приданим до експлуатації, якщо всі його паспортні параметри є більшими або рівними порівняно з розрахунковими вимогами..

7.3.1 Вибір високовольтних вимикачів

Для встановлення на лінійних приєднаннях ЗРУ 10 кВ ГЗП заводу попередньо обираємо вакуумний вимикач серії ВР1-10-20/630 У2. Перевірку його відповідності розрахунковим параметрам та комутаційній здатності наведено в табл. 7.2.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		50

Таблиця 7.2. Вибір лінійного вимикача

Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{\text{уст}} = 10 \text{ кВ}$	$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$
$I_p = 160,8 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$
$I_{p.\text{max}} = 321,7 \text{ А}$	$I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$
$I_{\text{пт}} \approx I'' = 7,1 \text{ кА}$	$I_{\text{вим.н}} = 20 \text{ кА}$
$i_{a.\tau} = 3,88 \text{ кА}$	$\sqrt{2} \cdot \beta_n I_{\text{дин}} / 100 = \sqrt{2} \cdot 30 \cdot 20 / 100 = 8,5 \text{ кА}$
$I'' = 7,1 \text{ кА}$	$I_{\text{дин}} = 20 \text{ кА}$
$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I'' = \sqrt{2} \cdot 1,834 \cdot 7,1 = 18,3 \text{ кА}$	$\sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot I_{\text{дин}} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 20 = 51 \text{ кА}$
$B_k = 104,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k = I_{\text{т.ном}}^2 \cdot t_{\text{т.ном}} = 20^2 \cdot 3 = 1200 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

де $i_{a\tau}$ – аперіодична складова струму КЗ в момент розходження дугогасних контактів:

$$i_{a.\tau} = \sqrt{2} \cdot I'' \cdot e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 7,1 \cdot e^{-0,052/0,055} = 3,88 \text{ кА};$$

де τ – мінімальний проміжок часу від початку виникнення КЗ до моменту розмикання контактів апарата:

$$\tau = t_{3.\text{min}} + t_{\text{в.ч}} = 0,01 + 0,042 = 0,052 \text{ с};$$

$t_{\text{в.ч}}$ – власний час вимикання апарата, який для сучасних вакуумних вимикачів становить не більше 0,035–0,05 с;

$t_{\text{в}}$ – повний час вимкнення КЗ для розрахунку термічної стійкості::

$$t_{\text{в}} = t_{\text{в.п}} + t_{\text{рз.макс}} = 0,065 + 2,0 = 2,065 \text{ с};$$

$t_{\text{в.п}}$ – повний час відключення вимикача з урахуванням часу горіння дуги 0,065 с;

β – нормоване заводське значення вмісту аперіодичної складової в струмі вимикання, визначається за кривою з [11];

B_k – тепловий імпульс струму КЗ:

$$B_k = I_{\text{п.о}}^2 (t_{\text{відк}} + T_a) = 7,08^2 \cdot (2,542 + 0,055) = 127,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

Порівняння розрахункових та каталожних параметрів показує, що попередньо обраний вимикач ВР1-10-20/630У2 задовольняє всім умовам перевірки.

Окремий розрахунок для інших комірок ЦРУ 10 кВ виробництва не виконується, оскільки тривалі робочі струми відхідних ліній значно менші за струми ввідного приєднання, а рівень струмів КЗ на шинах залишається незмінним. Крім того, за параметрами комутаційної та динамічної стійкості цей вимикач є базовим у лінійці виробника. З метою уніфікації обладнання та спрощення експлуатації, для встановлення на вводах, у секційній та лінійних комірках ЦРУ остаточно приймаємо однотипні вимикачі серії ВР1-10-20/630 У2.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		51

8.3.2 Вибір високовольтних запобіжників

Високовольтні запобіжники для захисту силових трансформаторів цехових підстанцій вирають за конструктивним виконанням (типом), номінальною напругою, тривалим струмом патрона, родом встановлення (внутрішнє чи зовнішнє), а також за граничним струмом вимикання.

Для захисту ліній живлення цехових ТП попередньо обираємо запобіжник серії ПКТ 03-10. Номінальний струм патрона становить $I_{п.пр.ном} = 100 \text{ А}$, а номінальний струм плавкої вставки $I_{п.в} = 80 \text{ А}$.

Перевірку відповідності технічних характеристик апарата параметрам мережі, що захищається наведено в табл. 7.3.

Таблиця 7.3. Вибір запобіжників (цехові ТП)

Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{дій} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{max} = 12,0 \text{ кВ}$
$I_p = 39,1 \text{ А}$	$I_{пв.ном} = 80 \text{ А}$
$I_{ав} = 78,2 \text{ А}$	$I_{пв.ном} = 80 \text{ А}$
$I'' = 6,44 \text{ кА}$	$I_{вим.ном} = 12,5 \text{ кА}$

де I_p – розрахунковий струм (ТП-2):

$$I_p = \frac{S_p}{n\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1428}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10,5} = 39,3 \text{ А};$$

$I_{ав}$ – струм, у аварійному режимі, що може протікати через запобіжник:

$$I_{ав} = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{1428}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 78,6 \text{ А}.$$

Отже, запобіжник ПКТ-103-10-100-12,5УЗ приймаємо його до встановлення.

7.3.3. Вибір вимикачів навантаження

Таблиця 7.3. Вибір вимикача навантаження

Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{дій} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{max} = 12 \text{ кВ}$
$I_p = 39,3 \text{ А}$	$I_{відкл.ном} = 400 \text{ А}$
$I_{макс} = 78,6 \text{ А}$	$I_{max} = 800 \text{ А}$
$i_{уд} = 16,74 \text{ кА}$	$i_{дин.ном} = 25 \text{ кА}$
$B_K = I''^2 \cdot (t_b + T_a) = 6,94^2 \cdot (0,008 + 0,055) = 3,0 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$I_{т.ном}^2 \cdot t_{т.ном} = 10^2 \cdot 1 = 100 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$

де $I_{\text{відкл.ном}}$ – нормований номінальний струм вимикання апарата за паспортом, А;
 $I_{\text{ав}}$ – розрахунковий струм післяаварійного режиму, який має надійно комутувати апарат.

Порівняння розрахункових параметрів мережі та каталожних характеристик підтверджує, що вимикач навантаження серії ВНРп-10/400-10зУЗ повністю задовольняє всім умовам перевірки, а отже може бути прийнятим до встановлення.

7.3.4. Вибір трансформаторів власних потреб

Система власних потреб ЦРУ 10 кВ виробництва належить до категорії особливо відповідальних споживачів. Від її безперебійної роботи залежить функціонування пристроїв релейного захисту, автоматики, телемеханіки, систем керування, сигналізації та оперативного струму, що безпосередньо впливає на загальну надійність електропостачання всього виробничого комплексу.

Оскільки сумарна потужність приймачів власних потреб є відносно невеликою, їхнє живлення реалізують від низьковольтної мережі 220/380 В, яка підключається до шин 10 кВ через знижувальні трансформатори власних потреб (ТВП).

Номінальну потужність ТВП підбирають за розрахунковим навантаженням із урахуванням коефіцієнтів завантаження та одночасності роботи електроприймачів. На об'єктах без постійного чергового персоналу за умови встановлення двох трансформаторів власних потреб (для забезпечення взаємного резервування) вибір здійснюють за критерієм::

$$S_{\text{т}} \geq S_{\text{р}}; \quad (7.10)$$

Детальний перелік споживачів та розрахунок сумарного навантаження власних потреб ЦРУ наведено в табл. 7.5.

Розрахункова потужність визначається за виразом:

$$S_{\text{р}} = k_{\text{с}} \sqrt{P_{\text{уст}}^2 + Q_{\text{уст}}^2} = 0,8 \cdot \sqrt{41^2 + 0^2} = 32,8 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

де $k_{\text{с}}$ – усереднений коефіцієнт попиту, який комплексно враховує коефіцієнти одночасності та завантаження обладнання власних потреб;

На основі отриманих результатів обираємо стандартний номінальний ряд і приймаємо до встановлення два трансформатори типу ТМ-40/10. Перевірка підтверджує правильність вибору:

$$S_{\text{т}} = 40 > S_{\text{р}} = 32,8 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		53

Таблиця 7.5. Навантаження власних потреб ЦРУ

Вид споживача	Установлена потужність, кВт		cosφ	Навантаження	
	одиниці	сумарна		P_y , кВт	Q_y , квар
Підігрів шаф КРП	1 x 16	16	1,0	16	0,0
Підігрів шаф РЗ	1 x16	16	1,0	16	0,0
Опалення, освітлення, вентиляція ЗРП	-	7	1,0	7	0,0
Споживання оперативними колами	-	2	1,0	2,0	0,0
Всього				41	0

7.3.5. Вибір трансформаторів струму

Вимірювальні трансформатори струму (ТС) вибирають за номінальною напругою електроустановки та максимальним розрахунковим струмом первинного кола. Обов'язковою вимогою є перевірка апарата за допустимим вторинним навантаженням для забезпечення потрібного класу точності, після чого виконується розрахунок на електродинамічну та термічну стійкість до струмів короткого замикання.

Для встановлення в лінійній комірці ЗРУ 10 кВ ГЗП машинобудівного заводу попередньо приймаємо трансформатор струму серії ТЛК-10/400. Детальну перевірку правильності вибору цього апарата за всіма технічними критеріями наведено в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6. Вибір трансформатору струму

Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{уст} = 10,5 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 12,0 \text{ кВ}$
$I_p = 160,8 \text{ А}$	$I_{ном} = 400 \text{ А}$
$I_{p.мах} = 321,6 \text{ А}$	$I_{ном} = 400 \text{ А}$
Клас точності 0,5S	0,5S
$i_y = 18,3 \text{ кА}$	$i_{дин} = 52 \text{ кА}$
$B_k = I''^2(t_b + T_a) = 7,06^2 \cdot (2,042 + 0,055) = 104,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k = I_{тер}^2 \cdot t_{тер} = 31,5^2 \cdot 1 = 992 \text{ кА}$
$Z_2 = 0,124 \text{ Ом}$	$Z_{2ном} = 0,4 \text{ Ом}$

Повне вторинне навантаження трансформатора струму визначається величиною Z_2 . Оскільки індуктивний опір струмових кіл є незначним, у практичних розрахунках ним нехтують і приймають $Z_2 = r_2$.

Спочатку визначимо опір вимірювальних приладів, підключених до вторинної обмотки трансформатора:

$$r_{\text{прил}} = S_{\text{прил}} / I_2^2 = 0,103 / 5^2 = 0,004 \text{ Ом};$$

де $S_{\text{прил}}$ – сумарна потужність, яку споживають підключені прилади, В·А;

I_2 – вторинний номінальний струм апарата (стандартно 5 А).

Далі розрахуємо максимально допустимий опір з'єднувальних проводів:

$$r_{\text{пр}} = Z_{2\text{ном}} - r_{\text{прил}} - r_{\text{к}} = 0,4 - 0,004 - 0,05 = 0,346 \text{ Ом};$$

де $Z_{2\text{ном}}$ – паспортне номінальне вторинне навантаження трансформатора струму для класу точності 0,5S;

де $r_{\text{к}}$ – перехідний опір контактних з'єднань, так як кількість приладів у колі менша за чотириох, то за інженерними нормами приймаємо $r_{\text{к}} = 0,05 \text{ Ом}$;

Номенклатуру вимірювальних приладів обрано на основі даних з [8, 9]. Розрахунок сумарної потужності, яку вони споживають, наведено в таблиці 7.7..

Таблиця 7.7. Розрахунок потужності, що споживають вимірювальні прилади

Прилад	Тип	Навантаження фази, В·А		
		А	В	С
Амперметр	Е-377	0,1	-	0,1
Лічильник універсальний	Honeywell A1800	0,003	-	0,003
Всього		0,103	-	0,103

За знайденим максимально допустимим опором $r_{\text{пр}}$ обчислюємо необхідний переріз струмопровідних жил з'єднувальних проводів:

$$S = \frac{\rho \cdot l_{\text{роз}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0,0175 \cdot 10}{0,346} = 0,506 \text{ мм}^2;$$

де ρ – питомий електричний опір матеріалу провідника, Ом/м·мм²;

l – фактична довжина кабельної траси вторинних кіл, визначається як:

$$l = \sqrt{3} \cdot l_{\text{роз}} = \sqrt{3} \cdot 6 = 10 \text{ м};$$

де $l_{\text{роз}}$ – орієнтовна розрахункова довжина проводів від трансформатора струму до панелі вимірювальних приладів, м.

З міркувань механічної міцності мінімальний переріз мідних проводів у струмових колах має бути не меншим 2,5 мм², згідно [1].

Фактичний електричний опір обраних з'єднувальних проводів становитиме:

$$r_{\text{пр}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{роз}}}{s} = \frac{0,0175 \cdot 9}{2,5} = 0,07 \text{ Ом};$$

Тоді дійсне сумарне навантаження на вторинну обмотку трансформатора струму дорівнює:

$$Z_2 = r_{\text{пр}} + r_{\text{прил}} + r_{\text{к}} = 0,07 + 0,004 + 0,05 = 0,124 \text{ Ом}.$$

Оскільки дійсне навантаження (0,125 Ом) не перевищує допустимого паспортного значення для класу точності 0,5S, ТС ТЛК-10-3-400/5У2 задовольняє технічні вимоги. Остаточно приймаємо його до встановлення.

Вибір та перевірку вимірювальних трансформаторів струму для решти приєднань виконано за аналогічною методикою. Усі результати розрахунків систематизовано та наведено в таблицях 7.8–7.10.

Таблиця 7.8. Потужність навантажень ТС

Прилади	Місце установки приладів					
	Ввід ЦРУ, СВ			КЛ 3, 4, 7-9, 10, 13, 14		
	Навантаження В·А			Навантаження В·А		
	А	В	С	А	В	С
Амперметр Е-377	0,1	-	0,1	0,1	-	0,1
Лічильник МТХ 3G20AD	-	-	-	1,0	-	1,0
Всього	0,1	-	0,1	1,1	-	1,1

Таблиця 7.9. Вторинне навантаження ТС

Призначення ТС	$r_{\text{прил}}$, Ом	$r_{\text{пр}}$, Ом	s , мм ²	$l_{\text{роз}}$, м	$r_{\text{пр}}$, Ом	Z_2 , Ом
Ввідна шафа ЦРУ, СВ	0,004	0,346	2,5	9	0,063	0,117
КЛ 3, 4, 7-10	0,044	0,306	2,5	5,5	0,07	0,164

Таблиця 7.10. Вибір трансформаторів струму ЦРУ 10 кВ

Умова вибору	Од. вим.	Призначення ТС						
		Ввід ЦРУ	СВ	КЛ 3, 4	КЛ-10	КЛ 9-7	КЛ-12, 13	
$U_{уст} < U_{max}$	кВ	$10,5 < 12$	$10,5 < 12$	$10,5 < 12$	$10,5 < 12$	$10,5 < 12$	$10,5 < 12$	
$I_p < I_{ном}$	А	$160,8 < 400$	$160,8 < 200$	$78,6 < 200$	$59,4 < 150$	$39,6 < 100$	$26 < 50$	
$I_{ав} < I_{ном}$	А	$321,6 < 400$	$160,8 < 200$	$157,2 < 200$	$118,9 < 150$	$79,2 < 100$	$26 < 50$	
Клас точності	-	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
$i_{уд} < i_{дин}$	кА	$16,74 < 52$	$16,74 < 52$	$16,74 < 52$	$16,74 < 52$	$16,74 < 52$	$16,74 < 25$	
$B_{к.р} < B_{к.н}$	кА ² ·с	$75,6 < 16^2 \cdot 3 = 768$	$51,5 < 16^2 \cdot 3 = 768$	$6,94^2 \cdot (0,542 + 0,0272) = 27,4 < 10^2 \cdot 3 = 300$				$27,4 < 4^2 \cdot 3 = 48$
$Z_2 < Z_n$	Ом	0,117 < 0,4		0,164 < 0,4				
Тип ТС	-	ТЛК-10-3-400/5	ТЛК-10-3-200/5	ТЛК-10-3-200/5	ТЛК-10-3-150/5	ТЛК-10-3-100/5	ТЛК-10-3-50/5	

7.3.6. Вибір трансформаторів напруги

Для комплектації комірок ЦРУ 10 кВ з шафами серії КУ-10Ц, до встановлення приймаємо трифазний антирезонансний трансформатор напруги серії НАМІ-10. Цей тип апаратів спеціально призначений для мереж 10 кВ з ізольованою нейтраллю, оскільки він стійкий до ферорезонансних процесів та надійно забезпечує живлення кіл комерційного обліку, вимірювання і релейного захисту.

Головною умовою правильної роботи трансформатора напруги (ТН) є збереження нормованого класу точності. Для цього фактичне сумарне навантаження всіх підключених до нього вторинних приладів не повинно перевищувати паспортну номінальну потужність апарата у відповідному класі (зазвичай 0.5 або 1.0 для розрахункового обліку).

Перелік підключених приладів та розрахунок їхнього сумарного вторинного навантаження на трансформатор напруги наведено в табл. 7.11. Остаточну перевірку відповідності технічних характеристик апарата НАМІ-10 параметрам мережі та розрахунковому навантаженню зведено в таблицю 7.12.

Таблиця 7.11. Вторинне навантаження ТН

Прилад	Тип	S , В·А	Кільк. приладів	Загальна споживана потужність, В·А
Лічильник універсальний	MTX 3G20AD	10	4	40
Вольтметр	E377	2	1	2
Разом				42

Таблиця 7.12. Вибір трансформатора напруги ЦРУ 10 кВ

Умова вибору	Од. вим.	Розрахункові дані	Каталожні дані
$U_{уст} \leq U_{ном}$	кВ	$U_{уст} = 10$ кВ	$U_{ном} = 10$ кВ
Схема з'єднань:	-	$Y_0/Y_0/\Delta-0$	$Y_0/Y_0/\Delta-0$
Клас точності:	-	0,5	0,5
$S_p \leq S_{ном}$	В·А	$S_p = 42$	$S_{н} = 120$

Результати розрахунків підтверджують, що попередньо обраний трансформатор напруги НАМІ-10-66УЗ повністю задовольняє всі технічні умови. Остаточного приймаємо цей апарат до встановлення у вимірювальних комірках.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		58

8 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ. «ЕЛЕКТРОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОВАЛЬСЬКО-ШТАМПУВАЛЬНИХ МАШИН»

8.1 Вступ

Електрозбереження є одним із найважливіших стратегічних завдань для промислового комплексу України. Вітчизняна індустріальна база тривалий час формувалася в умовах штучно заниженої вартості енергоносіїв, що призвело до поширення енергоємних технологій та масового використання морально й фізично зношеного обладнання. У сучасних ринкових реаліях висока електроємність виробництва суттєво знижує конкурентоспроможність продукції та створює додаткове навантаження на енергосистему країни.

Раціональне споживання електричної енергії також безпосередньо пов'язане з екологічними вимогами та зменшенням вуглецевого сліду. Основним споживачем електричної енергії в промисловості є електропривод — на силові електродвигуни припадає понад половину всього промислового енергоспоживання. Саме в цьому секторі зосереджено найбільший потенціал для оптимізації та електрозбереження.

Значна частина технологічних машин, зокрема ковальсько-штампувальне обладнання, все ще експлуатується з нерегульованими асинхронними двигунами. Через специфіку циклічного навантаження, а також прорахунки під час проектування та експлуатації, середній коефіцієнт завантаження таких електроприводів часто не перевищує 50%. Тривала робота електродвигунів у режимі недовантаження чи тривалого холостого ходу суттєво знижує їхній коефіцієнт корисної дії η та коефіцієнт потужності $\cos\phi$, що генерує значні втрати активної та реактивної потужності в масштабах підприємства.

Сучасні тенденції розвитку автоматизованого електропривода вимагають відмови від нерегульованих систем на користь керованих приводів змінного струму. Впровадження частотно-регульованих асинхронних та синхронних електроприводів дозволяє гнучко адаптувати споживання потужності до реального технологічного графіка роботи машини, забезпечуючи ефективне електрозбереження до 30–50% залежно від циклу роботи обладнання [12].

З огляду на це, розробка, дослідження та впровадження методів керування енергоефективністю ковальсько-штампувальних машин за допомогою сучасних засобів промислового електропривода й автоматизації є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить оптимізувати режими роботи обладнання та мінімізувати виробничі витрати.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						59

8.2 Напрями електрозбереження в ковальсько-штампувальних машинах

Перший напрям стосується найпоширеніших систем нерегульованого електропривода і полягає в оптимізації вибору потужності приводного двигуна для конкретного преса чи молота. Основна мета цього етапу – забезпечити номінальний тепловий режим роботи електродвигуна без невиправданого завищення його номінальних параметрів.

Проблема вибору є доволі гострою: асинхронний двигун заниженої потужності перегрівається під час пікових навантажень і швидко виходить з ладу, тоді як перерозмірнений двигун працює зі значним недовантаженням, що призводить до різкого зниження його коефіцієнта корисної дії (η) та коефіцієнта потужності ($\cos\phi$).

Для ковальсько-штампувального обладнання розв'язання цієї задачі є особливо складним через яскраво виражений ударно-циклічний характер роботи. Більшість таких машин (наприклад, механічні преси) працюють спільно з масивним маховиком, який акумулює кінетичну енергію і віддає її безпосередньо в момент штампування. Завдання ж електродвигуна полягає переважно у відновленні швидкості маховика під час технологічних пауз.

Якщо під час проектування розраховувати потужність привода виходячи з максимального зусилля деформування заготовки, ігноруючи динаміку маховика та перехідні процеси, це неминуче призведе до встановлення надлишково потужного двигуна. У результаті більшу частину робочого циклу такий електропривод працюватиме майже в режимі холостого ходу, перетворюючи енергію вкрай неефективно. Тому виконання точних розрахунків еквівалентного моменту, побудова реальних тахограм і навантажувальних діаграм з урахуванням махових мас механізму є визначальною умовою запобігання втратам електроенергії ще на етапі проектування.

Другий напрям підвищення економічності нерегульованого електропривода полягає в модернізації парку обладнання – переході на сучасні енергоефективні електродвигуни (наприклад, стандартів IE3 Premium або IE4 Super Premium) та спеціалізовані електричні машини, спроектовані для роботи з керованим електроприводом.

Двадцять років тому підвищення номінальних значень коефіцієнта корисної дії η та коефіцієнта потужності $\cos\phi$ досягалося переважно екстенсивним шляхом – за рахунок збільшення маси активних матеріалів: електротехнічної сталі (на 30–35%) та міді (на 20–25%). Це призводило до зростання загальної маси та вартості

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						60

двигуна майже на третину. Сучасний підхід до проектування енергоефективних машин базується на використанні високоякісних магнітних матеріалів з низькими питомими втратами, оптимізації геометрії магнітопровода та застосуванні інноваційних конструкцій ротора.

Для ковальсько-штампувальних машин, які через специфіку роботи з маховиком тривалий час перебувають у режимах недовантаження або холостого ходу (під час технологічних пауз), застосування таких сучасних електродвигунів дозволяє радикально знизити втрати активної енергії.

Доцільність заміни застарілого обладнання на сучасні енергоефективні аналоги необхідно обґрунтовувати техніко-економічним розрахунком. Попри вищу початкову вартість двигунів вищих класів енергоефективності, за нинішніх тарифів на електроенергію термін їхньої окупності є відносно коротким.

Орієнтовні залежності η та $\cos\phi$ від номінальної потужності для двигунів різних поколінь і класів енергоефективності наведено на рис. 8.1 [12].

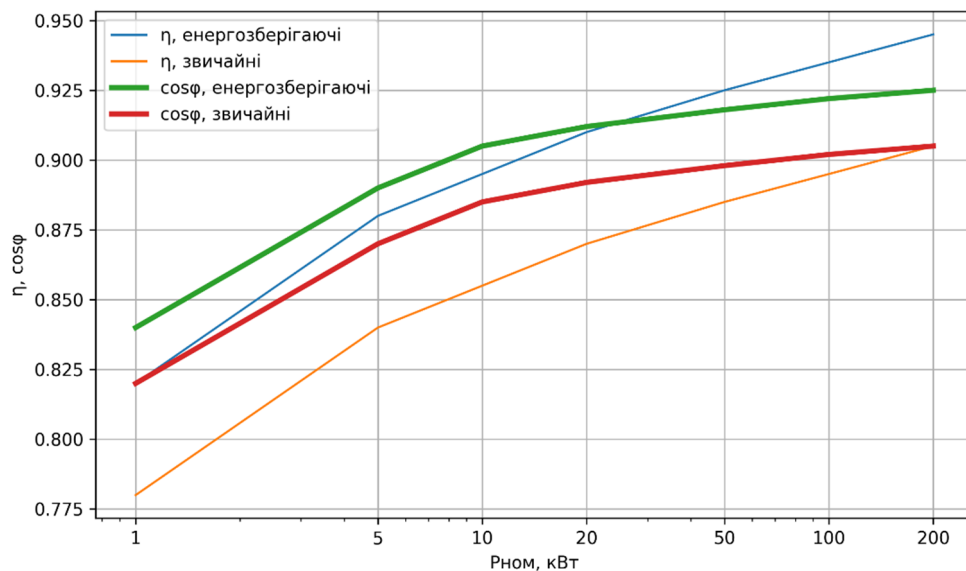


Рис. 8.1. Значення ККД та $\cos\phi$ для енергозберігаючих і звичайних двигунів

Третій напрям полягає в мінімізації або повному усуненні проміжних механічних передач. Проблема виникає через те, що промислова мережа постачає електроенергію з фіксованою частотою 50 Гц, тоді як для робочих органів машин необхідний широкий діапазон швидкостей і зусиль. Раніше цю невідповідність компенсували за допомогою масивних і малоефективних механічних вузлів.

Для ковальсько-штампувального обладнання це традиційно означало використання пасових передач, складних редукторів, важких маховиків та фрикційних муфт увімкнення. Сучасним рішенням є перехід до прямого привода

(наприклад, у кривошипних сервопресах), де електродвигун безпосередньо або через мінімальну кількість передач з'єднаний з виконавчим механізмом.

Узагальнена структурна схема традиційного електропривода з проміжними ланками включає: перетворювач або механічний регулятор швидкості (варіатор, муфту ковзання), з'єднувальну муфту, редуктор і робочий орган, що є частиною машини (рис. 8.2).

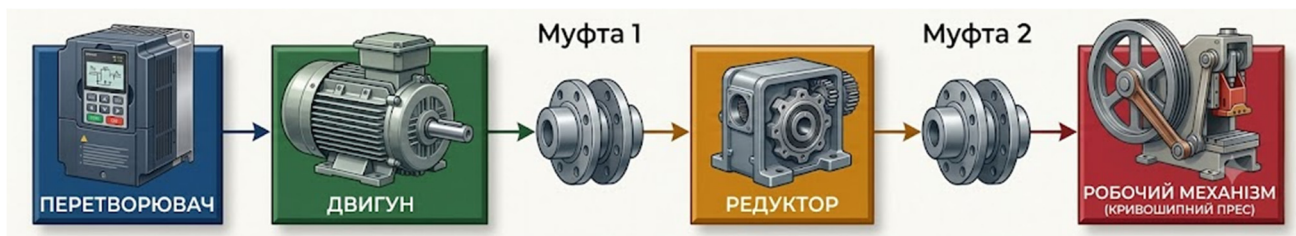


Рисунок 8.2. Узагальнена схема електропривода з проміжними передачами

Орієнтовні значення коефіцієнтів корисної дії η окремих елементів такої системи становлять:

- перетворювач електроенергії $\eta_{\text{п}} = 0,5-0,95$ (нижчі значення притаманні застарілим системам або роботі на малих швидкостях);
- електродвигун $\eta_{\text{д}} = 0,5-0,95$ (нижні межі – для мікромашин, вищі – для потужних промислових двигунів);
- механічний регулятор: $\eta_{\text{рег}} \approx 0,9-0,95$;
- з'єднувальна муфта: $\eta_{\text{м}} \approx 0,99$;
- редуктор: $\eta_{\text{р}} = 0,95$;
- робочий механізм: $\eta_{\text{рм}} \approx 0,95$.

Коефіцієнт корисної дії системи електропривода

$$\eta = \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{рег}} \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{рм}} \quad (8.1)$$

Якщо підставити у цю формулу усереднені значення для привода на базі асинхронного двигуна (АД) потужністю 10...100 кВт, загальний ККД системи перебуватиме в межах $\eta = 0,65...0,75$. При цьому близько 7...10% енергії незворотно втрачається саме в механічних ланках.

Отже, усунення зайвих механічних передач на користь регульованого електропривода є однією з найважливіших тенденцій розвитку електромеханічних систем. Для штампувальних машин це дозволяє не лише підвищити загальний ККД привода на 7...10%, але й суттєво розширити технологічні можливості обладнання завдяки точному керуванню швидкістю деформування заготовки.

Четвертий напрям полягає у зниженні електроспоживання самими технологічними машинами завдяки оптимізації процесу обробки металу. Для ковальсько-штампувального обладнання це означає раціональне використання енергії безпосередньо під час пластичного деформування заготовки та максимальне усунення непродуктивних витрат.

Підвищення енергоефективності на рівні виконавчого механізму реалізується через комплекс таких основних заходів:

- узгодження режимів роботи зі зміною навантаження – гнучка адаптація зусилля та швидкості пресування до властивостей конкретного металу, температури нагріву або габаритів деталі;

- підвищення механічного ККД установки – зменшення втрат на тертя в напрямних повзуна, модернізація кінематики механізмів та використання ефективніших систем змащування;

- регулювання продуктивності обладнання – зміна кількості робочих ходів за хвилину відповідно до реального темпу лінії чи оператора, що дозволяє практично виключити роботу в режимі холостого ходу;

- формування оптимальної циклограми та впорядкування графіка навантажень;

- постійний моніторинг технічного стану машини – контроль зносу робочого інструменту (штампів, бойків, матриць) та підшипникових вузлів;

- впровадження новітніх типів електропривода – перехід від традиційних систем з масивними маховиками та пневмомуфтами до сучасних сервопресів, які здатні формувати складні профілі швидкості штампування та рекуперувати енергію в мережу;

- організаційні заходи – грамотне планування виробничих змін, диспетчеризація цеху, навчання персоналу та виключення простоїв увімкненого високопотужного устаткування.

П'ятий напрям зосереджений на виборі раціональних режимів керування та грамотній експлуатації самого електропривода. Оскільки технологічні та організаційні аспекти усунення холостих простоїв ми розглянули в попередньому розділі, тут варто виділити суто електромеханічні та алгоритмічні способи електрозбереження, адаптовані до специфіки ковальсько-штампувальних машин:

- вибір оптимальних алгоритмів та діапазону регулювання швидкості – використання сучасних перетворювачів частоти дозволяє точно адаптувати швидкість електродвигуна до характеру ударного навантаження. Наприклад, система може забезпечувати максимальну швидкість під час холостого підведення

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						63

та відведення повзуна преса, а під час самого штампування – працювати на розрахунковій швидкості деформування металу;

- переведення привода в режим глибокого енергозбереження під час мікропауз – замість постійного обертання маховика на номінальних обертах під час очікування наступної заготовки, керований електропривод може автоматично знижувати швидкість до мінімально допустимої або переходити у «сплячий» режим, підтримуючи лише необхідну готовність;

- автоматичне зниження напруги на статорі двигуна – для потужних нерегульованих асинхронних приводів доцільно застосовувати тиристорні регулятори напруги (софтстартери) з функцією енергозбереження. Вони фіксують зниження навантаження на валу і пропорційно зменшують напругу на клеммах, що суттєво знижує струм намагнічування та втрати в магнітопроводі;

- мінімізація струму та втрат в асинхронному двигуні – застосування перетворювачів частоти з вбудованими алгоритмами автоматичної оптимізації поточного навантаження (Energy Saving Mode). Мікропроцесор у реальному часі розраховує та подає на статор рівно такий струм, який необхідний для подолання поточного навантаження, зводячи електричні втрати до мінімуму;

- оптимізація важких динамічних режимів – ковальське обладнання характеризується величезними маховими масами та частими циклами пуску/гальмування. Визначальним рішенням тут є відмова від механічних гальм або розсіювання енергії на гальмівних резисторах на користь систем рекуперативного гальмування. Завдяки активним випрямлячам (AFE) кінетична енергія масивних частин під час гальмування перетворюється на електричну і повертається назад у промислову мережу підприємства.

Практична реалізація розглянутих напрямів електрозбереження вимагає комплексного підходу та передбачає виконання таких інженерних етапів: детальний аудит технологічного процесу, техніко-економічне обґрунтування вибору системи, точний електромеханічний розрахунок та розробка відповідної конструкторської документації.

8.3 Частотне керування приводом кривошипного преса

Кривошипні преси є основним видом штампувального устаткування в машинобудівній галузі. Визначальною особливістю їхньої конструкції є наявність маховика в кінематичній схемі привода. Саме маховик під час виконання технологічної операції віддає накопичену кінетичну енергію, покриваючи пікові

навантаження преса. Загальний запас кінетичної енергії маховика визначається за формулою:

$$A_m = \frac{J_m \cdot \omega_m^2}{2}. \quad (8.2)$$

де J_m і ω_m – момент інерції та поточна кутова швидкість маховика відповідно.

Проте під час робочого ходу для деформування заготовки використовується лише невелика частка цієї енергії:

$$\Delta A = \frac{J_m}{2} (\omega_{m,\max}^2 - \omega_{m,\min}^2); \quad (8.3)$$

Зазвичай вона становить не більше 20–30%. Решта 70–80% залишається своєрідним «енергетичним баластом». Причина цього полягає в тому, що маховик механічно пов'язаний з АД головного привода. Цей двигун через свою жорстку механічну характеристику не допускає значного зниження частоти обертання ротора під навантаженням. Щоб забезпечити необхідну енергію удару при малому перепаді швидкості, необхідно збільшувати момент інерції маховика. Однак, максимальна швидкість обмежена вимогами міцності, тому нарощування інерції досягається за рахунок збільшення маси маховика. Це призводить до збільшення металоємності та створення значних консольних навантажень на вал преса.

Очевидний спосіб зменшити масу та габарити маховика – змусити його віддавати більшу частку кінетичної енергії за рахунок глибшого зниження швидкості під час удару. Однак у нерегульованому приводі це неминуче призведе до різкого зростання ковзання асинхронного двигуна:

$$s = \omega_0 - \omega, \quad (8.4)$$

де ω_0 – кутова швидкість магнітного поля статора;

ω – поточна кутова швидкість ротора двигуна.

Робота з великим ковзанням викликає критичні механічні, електричні та теплові перевантаження двигуна, що радикально скорочує термін його служби.

Ефективним способом подолання цих недоліків є перехід на частотне керування головним електроприводом. Швидкість обертання магнітного поля статора прямо пропорційна частоті живильної напруги f :

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}, \quad (8.5)$$

де p – число пар полюсів асинхронного двигуна.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		65

Змінюючи частоту напруги f , можна безперервно керувати швидкістю поля ω_0 протягом усього циклу роботи преса. Якщо під час удару синхронно знижувати частоту ω_0 слідом за природним падінням швидкості ротора ω , це дозволить безперешкодно зменшувати мінімальну швидкість маховика і відбирати з нього значно більше кінетичної енергії. При цьому ковзання АД залишатиметься в межах допустимих номінальних значень. Як наслідок, усуваються струмові перевантаження, знижується нагрів обмоток, підвищується загальний ККД привода та суттєво зменшується споживання електроенергії.

Найпростішим алгоритмом керування таким приводом є закон підтримки постійного ковзання ($s = \text{const}$) шляхом відповідної зміни частоти живильної напруги.

Водночас гнучкість налаштувань, яку забезпечують сучасні векторні перетворювачі частоти, дозволяє оптимізувати роботу кривошипного преса завдяки впровадженню складніших та ефективніших законів керування швидкістю.

Розглянемо практичний приклад аналізу роботи кривошипного гарячештампувального преса (КГШП) з номінальним зусиллям 25 МН, обладнаного частотно-регульованим електроприводом. Кінематична схема такого преса (рис. 8.3) включає: асинхронний двигун 1 головного привода, клинопасову передачу 2, масивний маховик 3, приводний вал 4 та зубчасту передачу 5. Виконавчий механізм складається з ексцентрикового вала 7, встановленого в підшипникових опорах 8, 9, шатуна 10 та повзуна 11. Повзун змонтований на направляючих 16, 17. Керування робочим циклом забезпечують муфта ввімкнення 12 та гальмо ексцентрикового вала 13. Деформування заготовки відбувається під час руху повзуна вниз за допомогою штампа, що складається з двох частин (рухомої на повзуні та нерухомої на столі преса).

Для порівняння спочатку доцільно змодельовати один робочий цикл КГШП 25 МН за традиційної нерегульованої схеми, коли двигун живиться від мережі зі сталою частотою ($f = 50$ Гц). Вихідні параметри: номінальна потужність електродвигуна – 160 кВт, момент інерції штатного маховика – 4900 кг·м², маса маховика – 8585 кг. На рис. 8.4 наведено отримані часові діаграми переміщення повзуна, частот обертання ротора та магнітного поля, споживаної активної потужності, а також номінального й еквівалентного фазних струмів. Основна мета цього етапу – перевірити, чи достатньо встановленої потужності двигуна та інерції маховика для виконання заданої технологічної операції без теплового перевантаження.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		66

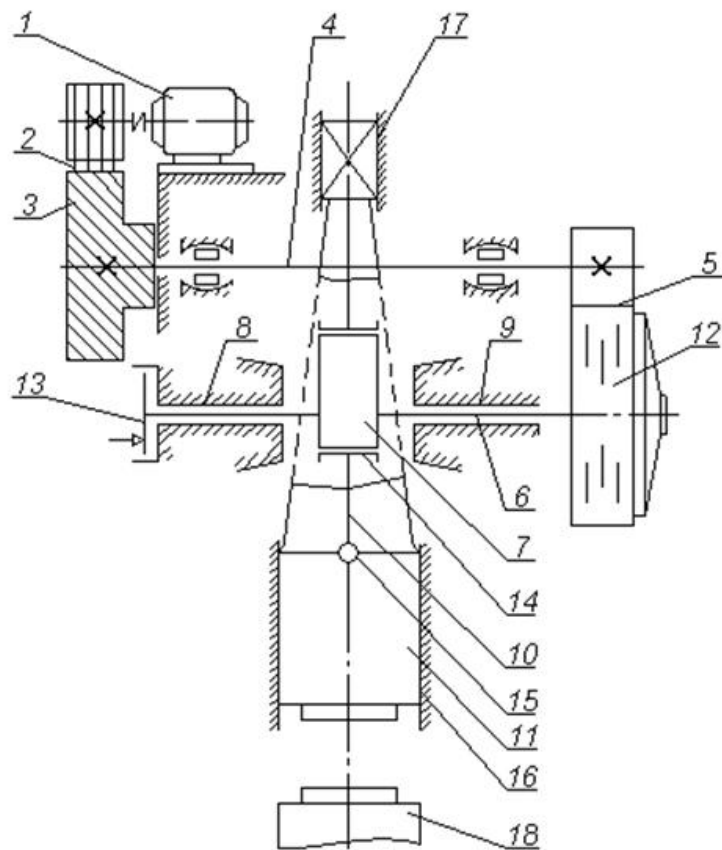


Рисунок 8.3. Конструктивна схема преса КГШП

Робочий цикл преса складається з таких послідовних етапів (рис. 8.4):

- вмикання муфти (на позначці 141,2 с), унаслідок чого ексцентрикний вал та інші ведені частини починають обертатися;
- хід повзуна вниз, який поділяється на фазу вільного наближення інструмента (141,2...141,7 с) та безпосередньо фазу пластичного деформування металу (141,7...141,9 с);
- зворотний хід повзуна вгору (141,9...142,6 с), після завершення якого муфта вимикається і спрацьовує гальмо;
- технологічна пауза (142,6...151,2 с), під час якої повзун нерухомий, а двигун відновлює швидкість маховика до початкового значення.

За результатами моделювання (на графіках ця зона залита) визначено ширину зони ковзання $\omega_0 - \omega$. Загальні витрати електроенергії на один цикл штампування за таких умов становлять 1,4 МДж. Максимальне відносне ковзання двигуна сягає критичних 14,1%. Щоб уникнути перегріву обмоток, максимально допустима продуктивність становить лише 2,4 ходи/хв. Повний запас кінетичної енергії маховика дорівнює 26,9 МДж, з яких на деформування витрачається 7,1 МДж (це лише 26,2% від загального енергетичного запасу).

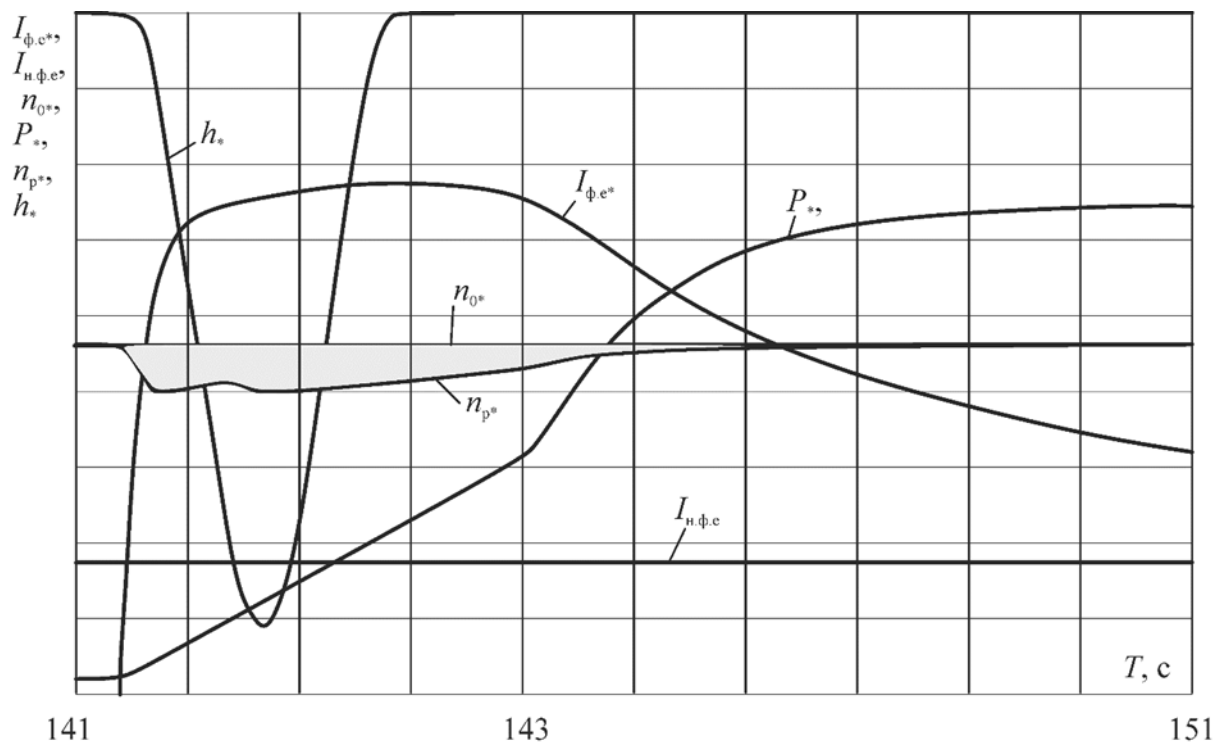


Рисунок 8.4. Характеристики пресу КГШП за постійної частоти живлячої напруги

Далі розглянемо роботу цього ж преса, але з частотно-регульованим приводом (ЧРП). Потужність двигуна залишається 160 кВт, проте момент інерції маховика зменшено майже вдвічі – до 2500 кг·м². Закон зміни частоти напруги живлення залежно від поточної швидкості ротора задано у вигляді полінома третьої степені:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \omega + \alpha_2 \omega^2 + \alpha_3 \omega^3, \quad (8.6)$$

де $\alpha = f/f_0$ – відносна частота живлячої напруги, причому $f_0 = 50$ Гц – стандартна промислова частота; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коефіцієнти полінома.

Щоб знайти оптимальний закон керування, який забезпечить найменші витрати енергії на цикл, було використано метод Нелдера-Міда (параметрами виступали коефіцієнти полінома). Аналіз показав, що в точці оптимуму значення $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ наближаються до нуля. Це доводить, що найефективнішим є режим підтримки постійного ковзання (який задається параметром α_0). Водночас цей алгоритм є найпростішим для технічної реалізації. Завдяки такому керуванню допустима продуктивність преса за умовами нагріву двигуна зростає до 7,92 ходів/хв.

Результати моделювання робочого циклу з використанням перетворювача частоти (в режимі постійного ковзання) показані на рис. 8.5.

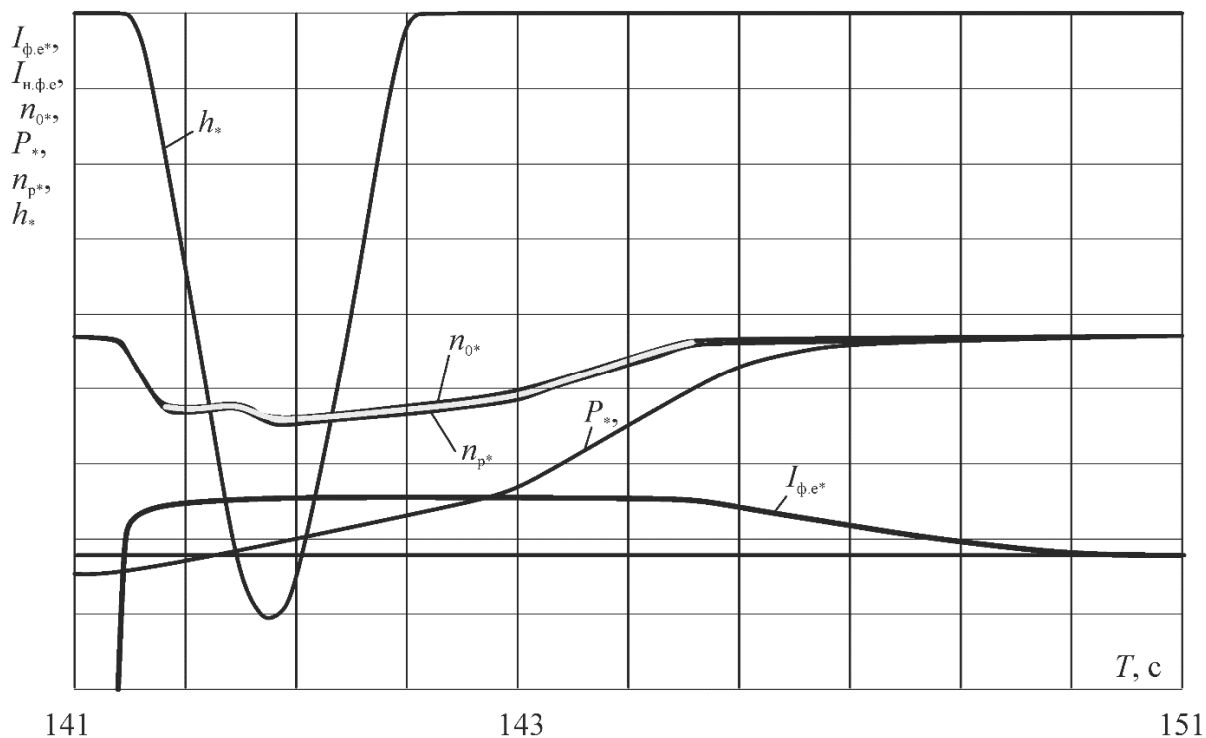


Рисунок 8.5. Характеристики пресу КГШП за змінної частоти живлячої напруги

Зона ковзання $\omega_0 - \omega$ тут значно вужча, ніж за прямого пуску від мережі. Витрати енергії на один цикл знизилися до 954,2 кДж, що становить 69,8% від споживання нерегульованого привода. Максимальне значення відносного ковзання

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (8.7)$$

не перевищує безпечних 2,6%. За таких умов повний запас кінетичної енергії модернізованого маховика становить 13,71 МДж. На виконання операції витрачається 5,86 МДж, що відповідає глибокому використанню кінетичної енергії – 42,74% від загального запасу. Найважливіший конструктивний здобуток полягає в тому, що маса маховика зменшується з 8,6 т до 5,3 т (на 38,4%). Це суттєво розвантажує консоль приводного вала і значно підвищує загальну надійність та запас міцності механічної частини КГШП.

8.4 Частотно-регульований електропривод з асинхронними двигунами

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна (АД) прямо пропорційна частоті живильної напруги. Отже, керувати швидкістю можна, змінюючи частоту напруги, що підводиться до статора. З іншого боку, електромагнітний момент двигуна залежить від магнітного потоку в повітряному

зазорі. Цей потік прямо пропорційний напрузі живлення та обернено пропорційний її частоті. Тому для підтримки необхідного моменту на валу під час зміни швидкості потрібно пропорційно регулювати й напругу.

Для забезпечення постійного моменту навантаження в усьому діапазоні регулювання швидкості перетворювач частоти повинен підтримувати сталим відношення напруги до частоти (закон скалярного керування):

$$U/f = \text{const}, \quad (8.8)$$

де U – напруга мережі живлення; f – частота на виході ПЧ.

Найпоширеніший метод формування такої напруги базується на принципі подвійного перетворення електроенергії. Спочатку змінна напруга промислової мережі (50 Гц) перетворюється на постійну за допомогою випрямляча, а потім знову перетворюється на змінну, але вже із заданими параметрами амплітуди та частоти, за допомогою автономного інвертора.

До основних елементів сучасної системи частотно-регульованого привода (ЧРП) належать: випрямляч, ланка постійного струму (з LC-фільтрами), автономний інвертор та мікропроцесорна система керування.

Попри велике розмаїття перетворювачів частоти від різних світових виробників, переважна більшість із них будується за єдиною класичною силовою топологією (рис. 6). Вона містить: трифазний мостовий діолдний випрямляч (В), LC-фільтр (Ф) у ланці постійного струму та трифазний автономний інвертор напруги (АІН) на IGBT транзисторах із керуванням за методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

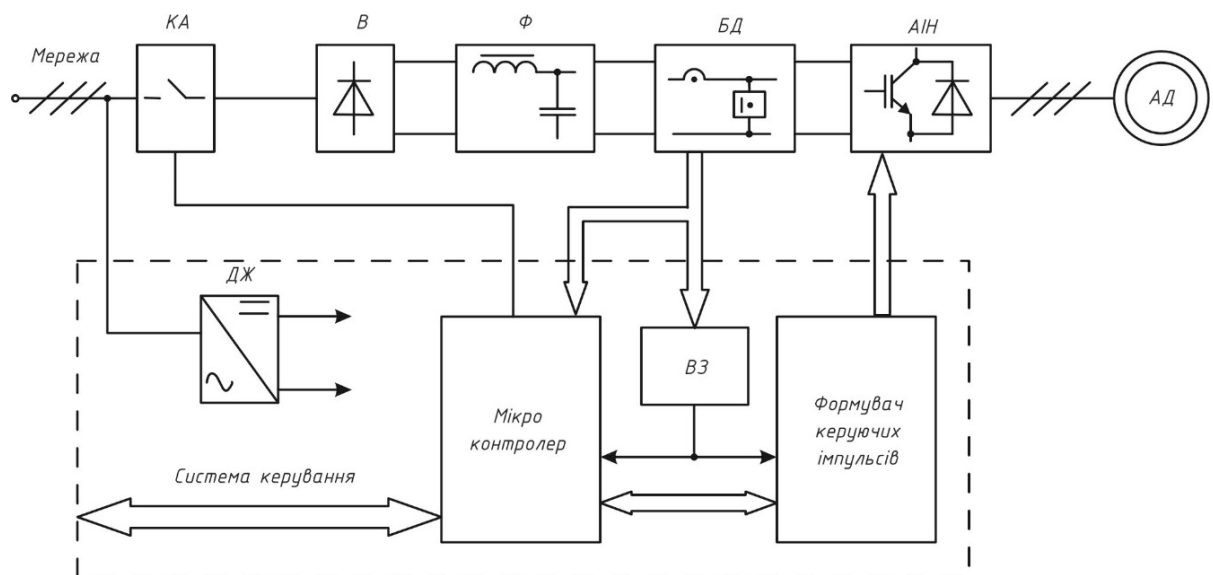


Рис. 8.6. Структурна схема ЧРП:

КА – комутаційний апарат системи керування; БД – блок сенсорів;
ДЖ – джерело живлення; ВЗ – вузол захисту; ФІ – формувач керуючих імпульсів.

					Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата	70

Принцип дії ЧРП полягає в такому. Змінна напруга промислової мережі з незмінною амплітудою та частотою ($U_{\text{вх}} = \text{const}, f_{\text{вх}} = \text{const}$) надходить на вхідний випрямляч. Для згладжування пульсацій випрямленої напруги використовується конденсаторний фільтр. Випрямляч разом із фільтром утворюють ланку постійного струму. З виходу фільтра згладжена постійна напруга U_d подається на вхід автономного інвертора напруги.

В інверторі постійна напруга U_d перетворюється на трифазну імпульсну напругу зі змінними параметрами амплітуди й частоти. За сигналами мікроконтролера кожна фазна обмотка двигуна по чергові підключається до позитивного або негативного полюса ланки постійного струму через відповідні силові транзистори. Тривалість цих підключень змінюється за синусоїдальним законом: найширші імпульси формуються посередині напівперіоду, а ближче до його початку та кінця вони звужуються. Такий алгоритм називається широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Вихідна амплітуда та частота напруги, що прикладається до статора, задаються відповідними параметрами модульовального сигналу в мікропроцесорі.

Завдяки високій несучій частоті ШІМ (від 2 до 15 кГц) обмотки статора, маючи значну індуктивність, виконують роль природного фільтра. Тому струм, що протікає через двигун, набуває практично ідеальної синусоїдальної форми.

8.5 Вибір перетворювача частоти

Специфіка ударно-циклічного навантаження кривошипного преса висуває надзвичайно жорсткі вимоги до перетворювача частоти (ПЧ). Враховуючи періодичні пікові навантаження під час штампування та високі моменти інерції маховика, ПЧ повинен забезпечувати високу динаміку керування моментом і мати значну перевантажувальну здатність. Для механізмів такого типу ПЧ вибирають за режимом експлуатації Heavy Duty, що гарантує перевантаження за струмом не менше 150% від номінального значення протягом 60 с та до 200% протягом 2...3 с під час прямого удару.

Вибір оптимальної моделі перетворювача здійснюється не лише за номінальною потужністю, а насамперед за струмовими критеріями. Основні умови правильного вибору мають такий вигляд:

За номінальним струмом тривалого режиму:

$$I_{\text{ПЧ.НОМ}} > I_{\text{ДВ.НОМ}}, \quad (8.9)$$

За максимальним струмом під час ударного навантаження:

$$I_{\text{ПЧ.НОМ}} > I_{\text{ДВ.НОМ}}, \quad (8.10)$$

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		71

На сучасному ринку промислової автоматизації цим вимогам повною мірою відповідають перетворювачі векторного типу від провідних виробників, зокрема:

- ABB (серія промислових приводів єдиної архітектури ACS880);
- Danfoss (новітня серія iC7, що прийшла на зміну класичній лінійці VLT);
- Control Techniques (серія Unidrive M700);
- Siemens (модульна система SINAMICS S120).

Розглянемо докладніше особливості застосування сучасних перетворювачів на прикладі серії ABB ACS880. Перевагою цієї серії є використання алгоритму прямого керування моментом (DTC – Direct Torque Control). На відміну від класичного векторного керування з ШІМ, технологія DTC обчислює стан магнітного потоку та моменту двигуна десятки тисяч разів на секунду. Завдяки цьому привод здатний миттєво (без затримок на математичні фільтри) реагувати на екстремальні ударні навантаження кривошипного преса, підтримуючи задану швидкість і момент навіть на навколонульових швидкостях без застосування датчика зворотного зв'язку (енкодера).

Для безпечної експлуатації у складі ковальсько-штампувального обладнання такі перетворювачі обов'язково комплектуються гальмівними переривачами (чоперами) для скидання надлишкової кінетичної енергії маховика на зовнішні гальмівні резистори, або ж оснащуються активними випрямлячами (AFE) для рекуперації цієї енергії назад у промислову мережу підприємства..

Для практичного підтвердження розглянутих принципів виконаємо числовий розрахунок і вибір перетворювача частоти для головного привода кривошипного гарячештампувального преса.

Каталожні дані електродвигуна преса:

- номінальна потужність: $P_{\text{дв.ном}} = 160 \text{ кВт}$;
- номінальна напруга живлення: $U_{\text{дв.ном}} = 400 \text{ В}$;
- номінальний струм статора (4р двигун): $I_{\text{дв.ном}} \approx 285 \text{ А}$.

Умови експлуатації (важкий ударний режим):

Для подолання пікових навантажень під час удару штампа та відновлення швидкості маховика перетворювач повинен забезпечувати перевантаження за струмом не менше 150% протягом 60 с. Відповідно, мінімально необхідний струм перевантаження становить:

$$I_{\text{вим.макс}} = 1,5 \cdot I_{\text{дв.ном}} = 1,5 \cdot 285 = 427,5 \text{ А}.$$

Як кандидата розглядаємо промисловий перетворювач серії ABB ACS880-01-363A-3, який має подвійний номінал потужності (Dual Rating). Його заводські технічні характеристики:

- тривалий струм у нормальному режимі (Normal Duty, для насосів/вентиляторів): $I_{\text{пч.ном}} = 363 \text{ А}$ (відповідає потужності 200 кВт);

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		72

- тривалий струм у важкому режимі (Heavy Duty, для пресів/кранів):

$I_{\text{пч.НД}} = 302 \text{ А}$ (відповідає потужності 160 кВт);

- максимальний вихідний струм (протягом 10 с при пуску або екстремальному динамічному ударі): $I_{\text{макс}} = 560 \text{ А}$.

Перевірка умов вибору:

- за тривалим струмом у важкому режимі роботи

$$I_{\text{пч.НД}} \geq I_{\text{дв.ном}}, \text{ А};$$

$$302 \text{ А} \geq 285 \text{ А}.$$

умова виконується. Перетворювач здатен тривало жити електродвигун без ризику теплового деградування силових IGBT-транзисторів;

- за струмом робочого перевантаження на рівні $1,5 \cdot I_{\text{пч.НД}}$ у режимі Heavy Duty (150% протягом 1 хв):

$$1,5 \cdot 302 = 453 \text{ А} \geq 427,5 \text{ А},$$

умова виконується. Наявний струмовий резерв гарантує стабільне проходження робочого циклу деформування заготовки без переходу системи в аварійний стан;

- за кратністю пікового ударного струму:

$$k_{\text{п}} = I_{\text{макс}} / I_{\text{дв.ном}} = 560 / 285 = 1,96,$$

максимальний струм перетворювача дозволяє короткочасно генерувати струм, що становить 196% від номінального струму двигуна. Це повністю задовольняє найжорсткіші вимоги до динаміки електропривода кривошипного преса.

Отже, для АД потужністю 160 кВт, що експлуатується в умовах ударно-циклічного навантаження, вибір ПЧ з паспортними параметрами 200 кВт / 363 А гарантує стабільне забезпечення необхідної потужності важкому режимі експлуатації та запобігає аварійним відключенням електропривода внаслідок струмових перевантажень (Overcurrent) під час пікових зусиль преса.

До комплектації ПЧ необхідно додати вбудований гальмівний переривач (опція +D150) та зовнішній гальмівний резистор. Зважаючи на високий рівень вібрацій та агресивне середовище ковальського цеху, керування приводом доцільно реалізувати на базі вбудованого безсенсорного алгоритму DTC.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		
						73

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено систему електропостачання ковальсько-штампувального виробництва заводу сільськогосподарського машинобудування.

Електричні навантаження цехів визначено методом впорядкованих діаграм. Сумарне розрахункове навантаження на збірних шинах 10 кВ ЦРУ становить 5,8 МВт активної та 6,1 Мвар реактивної потужності.

Добові та річні графіки навантажень побудовано на підставі типових графіків підприємства з урахуванням сезонної складової (зимовий та літній періоди) і розподілу між робочими та вихідними днями.

Для внутрішнього електропостачання опрацьовано два варіанти підключення від ГЗП заводу двома кабельними лініями 10 кВ завдовжки 0,25 км із спорудженням ЦРУ:

- радіальна схема з глухим приєднанням трансформаторів цехових ТП до кабельних ліній;
- змішана схема, за якої трансформатори підключаються до КЛ через вимикачі навантаження та високовольтні запобіжники.

За підсумками техніко-економічного порівняння прийнято другий варіант.

Аналіз балансу реактивної потужності підтвердив потребу в її компенсації. Обрано такі компенсаційні установки: на стороні 10 кВ: УКРМ-10-450УЗ, на стороні 0,4 кВ: УКРМ-0,4-400 та УКРМ-0,4-600.

Розрахунок струмів короткого замикання в мережі 10 кВ виконано в системі відносних базисних одиниць. На підставі отриманих значень вибрано основне високовольтне обладнання: вакуумні вимикачі ВР1-10-20/630УЗ з електромагнітним приводом, трансформатори струму ТЛК-10-3, вимикачі навантаження ВНРп-10/400-10зУЗ, запобіжники ПКТ-103-10-100-12,5УЗ, а також кабельні лінії напругою 10 кВ.

У спеціальному проаналізовано перспективні напрями електрозбереження для ковальсько-штампувального устаткування. На конкретному прикладі обґрунтовано доцільність впровадження частотно-регульованого привода у системах керування найважливішим технологічним обладнанням – пресами. Теоретичні розрахунки підтвердили, що використання перетворювача частоти в контурі головного електропривода дозволяє знизити споживання електроенергії до 30%. На основі цих даних здійснено практичний вибір перетворювача частоти для асинхронного двигуна кривошипного гарячештапувального преса.

Загалом робота повністю відповідає чинним нормативно-технічним та економічним вимогам до систем промислового електропостачання.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		74

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Форт, 2017.
2. Василега П. О. Електропостачання: підручник / П. О. Василега. – Суми: Сумський державний університет, 2019. – 521 с..
3. Маліновський А.А., Хохулін Б.К. Основи електропостачання. – Львів: Видавництво Національного університету у «Львівська політехніка», 2005.
4. Рудницький В. Г. Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування / В. Г. Рудницький – Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. – 153 с.
5. Бурбело М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків: навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.
6. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів./ Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен / За ред. Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002.
7. Перехідні процеси в системах електропостачання: / М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець. – Харків: ТОВ «В справі», 2016. – 260 с.
8. Лежнюк П. Д. Проектування електричної частини електричних станцій / П. Д. Лежнюк, В. М. Лагутін, В. В. Тептя. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 194 с.
9. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович, П. Г. Плешков, О. А. Козловський та ін. М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2020. – 274 с.
10. Енергозбереження в промисловості. Частина 1 / А. В. Праховник, О. М. Суходоля, С. П. Денисюк, В. В. Прокопенко – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 517 с.
11. Практичний посібник з енергозбереження для об'єктів промисловості, будівництва та житлово-комунального господарства України / Праховник А. В., Прокопенко В. В., Беленький А. М. та ін. – Луганськ: Вид-во «Місячне сяйво», 2010.
12. Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода – К.: Кондор, 2005.

						Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		75

Додаток А. Розрахунок графіків електричних навантажень

Таблиця А.1. Розрахунок добових графіків активної, реактивної повної потужностей робочої зимової доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{pj}, \%$	$P_{jз}, \text{кВт}$	$n_{qj}, \%$	$Q_{jз}, \text{квар}$	$S_{jз}, \text{кВА}$
1	0 – 1	50,0	2888,9	60,0	524,2	2936,0
2	1 – 2	55,0	3177,7	60,0	524,2	3220,7
3	2 – 3	57,0	3293,3	77,0	672,7	3361,3
4	3 – 4	45,0	2600,0	66,0	576,6	2663,1
5	4 – 5	45,0	2600,0	66,0	576,6	2663,1
6	5 – 6	40,0	2311,1	62,0	541,6	2373,7
7	6 – 7	42,0	2426,6	66,0	576,6	2494,2
8	7 – 8	47,0	2715,5	62,0	541,6	2769,0
9	8 – 9	84,0	4853,3	90,0	786,2	4916,5
10	9 – 10	95,0	5488,8	95,0	829,9	5551,2
11	10 – 11	100,0	5777,7	100,0	873,6	5843,3
12	11 – 12	83,0	4795,5	90,0	786,2	4859,5
13	12 – 13	77,0	4448,8	88,0	768,8	4514,8
14	13 – 14	82,0	4737,7	97,0	847,4	4812,9
15	14 – 15	96,0	5546,6	97,0	847,4	5610,9
16	15 – 16	97,0	5604,4	89,0	777,5	5658,0
17	16 – 17	80,0	4622,2	80,0	698,9	4674,7
18	17 – 18	60,0	3466,6	85,0	742,6	3545,3
19	18 – 19	72,0	4159,9	87,0	760,0	4228,8
20	19 – 20	77,0	4448,8	87,0	760,0	4513,3
21	20 – 21	72,0	4159,9	85,0	742,6	4225,7
22	21 – 22	77,0	4448,8	86,0	751,3	4511,8
23	22 – 23	80,0	4622,2	83,0	725,1	4678,7
24	23 – 24	72,0	4159,9	85,0	742,6	4225,7

Таблиця А.2. Розрахунок добових графіків активної, реактивної і повної потужностей вихідної зимової доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{pj}, \%$	$P_{jз}, \text{кВт}$	$n_{qj}, \%$	$Q_{jз}, \text{квар}$	$S_{jз}, \text{кВА}$
1	0 – 1	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
2	1 – 2	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
3	2 – 3	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
4	3 – 4	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
5	4 – 5	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
6	5 – 6	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
7	6 – 7	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
8	7 – 8	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
9	8 – 9	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
10	9 – 10	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
11	10 – 11	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
12	11 – 12	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
13	12 – 13	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
14	13 – 14	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
15	14 – 15	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
16	15 – 16	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
17	16 – 17	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
18	17 – 18	36,0	2080,0	35,0	305,8	2102,3
19	18 – 19	38,0	2195,5	46,0	401,9	2232,0
20	19 – 20	38,0	2195,5	46,0	401,9	2232,0
21	20 – 21	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
22	21 – 22	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
23	22 – 23	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8
24	23 – 24	40,0	2311,1	46,0	401,9	2345,8

Таблиця А.3. Розрахунок добових графіків активної, реактивної повної потужностей робочої літньої доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{pj}, \%$	$P_{jл}, \text{кВт}$	$n_{qj}, \%$	$Q_{jл}, \text{квар}$	$S_{jл}, \text{кВА}$
1	0 – 1	42,0	2062,6	39,0	289,6	2082,9
2	1 – 2	43,0	2111,7	40,0	297,0	2132,5
3	2 – 3	46,0	2259,1	51,0	378,7	2290,6
4	3 – 4	43,0	2111,7	36,0	267,3	2128,6
5	4 – 5	43,0	2111,7	38,0	282,2	2130,5
6	5 – 6	42,0	2062,6	42,0	311,9	2086,1
7	6 – 7	52,0	2553,7	57,0	423,3	2588,6
8	7 – 8	66,0	3241,3	65,0	482,7	3277,0
9	8 – 9	87,0	4272,6	77,0	571,8	4310,7
10	9 – 10	93,0	4567,3	93,0	690,6	4619,2
11	10 – 11	100,0	4911,0	100,0	742,6	4966,9
12	11 – 12	96,0	4714,6	98,0	727,7	4770,4
13	12 – 13	78,0	3830,6	98,0	727,7	3899,1
14	13 – 14	86,0	4223,5	82,0	608,9	4267,2
15	14 – 15	96,0	4714,6	84,0	623,8	4755,7
16	15 – 16	97,0	4763,7	84,0	623,8	4804,4
17	16 – 17	82,0	4027,1	82,0	608,9	4072,8
18	17 – 18	65,0	3192,2	71,0	527,2	3235,4
19	18 – 19	86,0	4223,5	82,0	608,9	4267,2
20	19 – 20	87,0	4272,6	76,0	564,3	4309,7
21	20 – 21	75,0	3683,3	62,0	460,4	3711,9
22	21 – 22	78,0	3830,6	72,0	534,6	3867,7
23	22 – 23	82,0	4027,1	80,0	594,0	4070,6
24	23 – 24	64,0	3143,1	45,0	334,2	3160,8

Таблиця А.4. Розрахунок добових графіків активної, реактивної і повної потужностей вихідної літньої доби

Номер інтервалу	Інтервал t , год	$n_{pj}, \%$	$P_{jл}, \text{кВт}$	$n_{qj}, \%$	$Q_{jл}, \text{квар}$	$S_{jл}, \text{кВА}$
1	0 – 1	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
2	1 – 2	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
3	2 – 3	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
4	3 – 4	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
5	4 – 5	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
6	5 – 6	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
7	6 – 7	24,0	1178,7	35,0	259,9	1207,0
8	7 – 8	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
9	8 – 9	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
10	9 – 10	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
11	10 – 11	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
12	11 – 12	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
13	12 – 13	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
14	13 – 14	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
15	14 – 15	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
16	15 – 16	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
17	16 – 17	24,0	1178,7	25,0	185,6	1193,2
18	17 – 18	29,0	1424,2	25,0	185,6	1436,3
19	18 – 19	29,0	1424,2	28,0	207,9	1439,3
20	19 – 20	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
21	20 – 21	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
22	21 – 22	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
23	22 – 23	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1
24	23 – 24	30,0	1473,3	35,0	259,9	1496,1

Таблиця А.5. Розрахунок річних графіків за активної, реактивної та повної потужностей

№ п/п	Тривалість ступеня, год	Потужність P , год	Тривалість ступеня, год	Потужність Q , квар	Тривалість ступеня, год	Потужність S , кВ·А
1	2	3	4	5	6	7
1	147	5777,7	147	873,6	147	5843,4
2	147	5604,4	147	847,4	147	5658,0
3	147	5546,6	147	847,4	147	5610,9
4	147	5488,8	147	829,9	147	5551,2
5	105	4911,0	147	786,2	105	4966,9
6	147	4853,3	147	786,2	147	4916,5
7	147	4795,5	147	777,5	147	4859,5
8	105	4763,7	147	768,8	147	4812,9
9	147	4737,7	147	760,0	105	4804,4
10	105	4714,6	147	760,0	105	4770,4
11	105	4714,6	147	751,3	105	4755,7
12	147	4622,2	147	742,6	147	4678,7
13	147	4622,2	147	742,6	147	4674,7
14	105	4567,3	147	742,6	105	4619,2
15	147	4448,8	147	725,1	147	4514,8
16	147	4448,8	147	698,9	147	4513,3
17	147	4448,8	147	672,7	147	4511,8
18	105	4272,6	147	576,6	105	4310,7
19	105	4272,6	147	576,6	105	4309,7
20	105	4223,5	147	576,6	105	4267,2
21	105	4223,5	147	541,6	105	4267,2
22	147	4159,9	147	541,6	147	4228,8
23	147	4159,9	147	524,2	147	4225,7
24	147	4159,9	147	524,2	147	4225,7
25	105	4027,1	65	401,9	105	4072,8
26	105	4027,1	65	401,9	105	4070,6
27	105	3830,6	65	401,9	105	3899,1
28	105	3830,6	65	401,9	105	3867,7
29	105	3683,3	65	401,9	105	3711,9
30	147	3466,6	65	401,9	147	3545,3
31	147	3293,3	65	401,9	147	3361,3
32	105	3241,3	65	401,9	105	3277,0
33	105	3192,2	65	401,9	105	3235,4
34	147	3177,7	65	401,9	147	3220,7
35	105	3143,1	65	401,9	105	3160,8
36	147	2888,9	65	401,9	147	2936,0
37	147	2715,5	65	401,9	147	2769,0
38	147	2600,0	65	305,8	147	2663,1
39	147	2600,0	65	305,8	147	2663,1
40	105	2553,7	65	305,8	105	2588,6
41	147	2426,6	65	305,8	147	2494,2
42	65	2311,1	65	305,8	147	2373,7
43	65	2311,1	65	305,8	65	2345,8
44	65	2311,1	65	305,8	65	2345,8
45	147	2311,1	65	305,8	65	2345,8
46	65	2311,1	65	305,8	65	2345,8

Продовження табл. А.5

1	2	3	4	5	6	7
47	65	2311,1	65	305,8	65	2345,8
48	65	2311,1	65	305,8	65	2345,8
49	65	2311,1	105	259,9	65	2345,8
50	65	2311,1	105	259,9	65	2345,8
51	65	2311,1	105	259,9	65	2345,8
52	65	2311,1	105	259,9	65	2345,8
53	65	2311,1	48	259,9	65	2345,8
54	105	2259,1	48	259,9	105	2290,6
55	65	2195,5	48	259,9	65	2232,0
56	65	2195,5	48	259,9	65	2232,0
57	105	2111,7	105	259,9	105	2132,5
58	105	2111,7	48	259,9	105	2130,5
59	105	2111,7	105	259,9	105	2128,6
60	65	2080,0	48	259,9	65	2102,3
61	65	2080,0	48	259,9	65	2102,3
62	65	2080,0	48	259,9	65	2102,3
63	65	2080,0	48	259,9	65	2102,3
64	65	2080,0	105	259,9	65	2102,3
65	65	2080,0	48	259,9	65	2102,3
66	65	2080,0	48	259,9	65	2102,3
67	65	2080,0	105	259,9	65	2102,3
68	65	2080,0	105	259,9	65	2102,3
69	65	2080,0	48	259,9	65	2102,3
70	65	2080,0	105	259,9	65	2102,3
71	105	2062,6	105	259,9	105	2086,1
72	105	2062,6	105	259,9	105	2082,9
73	48	1473,3	48	207,9	48	1496,1
74	48	1473,3	105	207,9	48	1496,1
75	48	1473,3	105	185,6	48	1496,1
76	48	1473,3	105	185,6	48	1496,1
77	48	1473,3	48	185,6	48	1496,1
78	48	1473,3	48	185,6	48	1496,1
79	48	1473,3	48	185,6	48	1496,1
80	48	1473,3	48	185,6	48	1496,1
81	48	1473,3	105	185,6	48	1496,1
82	48	1473,3	48	185,6	48	1496,1
83	48	1473,3	48	185,6	48	1496,1
84	48	1424,2	105	185,6	48	1439,3
85	48	1424,2	48	185,6	48	1436,3
86	48	1178,7	105	185,6	48	1207,0
87	48	1178,7	105	185,6	48	1193,2
88	48	1178,7	105	185,6	48	1193,2
89	48	1178,7	105	185,6	48	1193,2
90	48	1178,7	105	185,6	48	1193,2
91	48	1178,7	48	185,6	48	1193,2
92	48	1178,7	105	185,6	48	1193,2
93	48	1178,7	48	185,6	48	1193,2
94	48	1178,7	105	185,6	48	1193,2
95	48	1178,7	48	185,6	48	1193,2
96	48	1178,7	48	185,6	48	1193,2
Всього	8760		8760		8760	