

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет автоматизації виробництва, інформаційних та
управлінських технологій
Кафедра автоматизації, електро- та робототехнічних систем

«Допущено до захисту»

Гарант ОПП

Вікторія МІРОШНИЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології в металургії та
гірництві»

за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології

на тему «Система автоматизації турбоповітродувки в умовах ТЕЦ
металургійного комбінату»

Керівник роботи

Вікторія МІРОШНИЧЕНКО

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень та напрацювань.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело. Електронний та паперовий варіанти роботи є ідентичними.*

Кваліфікаційна робота містить інформацію з обмеженим доступом.

Здобувач

Ігор СКОРИК

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Олег БОНДАР

Запоріжжя 2026



ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	автоматизації виробництва, інформаційних та управлінських технологій
Кафедра	автоматизації, електро- та робототехнічних систем
Ступінь вищої освіти	бакалавр
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
ОПП	Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології в металургії та гірництві

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Вікторія МІРОШНИЧЕНКО

17.05.2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Скорика Ігоря Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Система автоматизації турбоповітродувки в умовах ТЕЦ металургійного комбінату»

керівник роботи Мірошніченко Вікторія Ігорівна, доцент, канд. техн. наук,

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

затверджені наказом Університету від 41/23.02.2026 від 23.02.2026 р.

2. Термін подання роботи 17.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з автоматизації, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, дослідницькі роботи з тематики автоматичного регулювання та управління, літературні джерела, технологічні інструкції, результати власних експериментів та досліджень тощо

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз предметної області (літературний огляд, недоліки існуючих систем, сучасні тенденції). 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи управління та сигналізації технологічних параметрів. 3. Реалізація запропонованої системи. 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи. 5. Охорона праці. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Схема структурна автоматизації. Схема функціональна автоматизації. Схема структурна комплексу технічних засобів. Принципово-електрична схема контуру. Результати розрахунків

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1-5	Мірошніченко В.І., доцент кафедри АБЕРС

7. Дата видачі завдання 17.05.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Аналіз предметної області	25.05.2026
2	Розділ 2. Постановка задач автоматизації та обґрунтування запропонованої структури системи автоматизації	30.05.2026
3	Розділ 3. Реалізація запропонованої системи автоматизації	01.06.2026
4	Розділ 4. Економічне обґрунтування запропонованої системи автоматизації	12.06.2026
5	Розділ 5. Охорона праці	14.06.2026
6	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, реферат	15.06.2026
7	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	17-18.06.2026
8	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу, автореферату	19-21.06.2026
9	Рецензування завершеної роботи. Захист	22-24.06.2026

Здобувач

(Ігор СКОРИК)

Керівник роботи

(Вікторія МІРОШНИЧЕНКО)

АНОТАЦІЯ

Скорика Ігоря Вікторовича. Система автоматизації турбоповітродувки в умовах ТЕЦ металургійного комбінату. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології в металургії та гірництві» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єктом дослідження є турбоповітродувка (ТПД) турбінного цеху теплоелектроцентралі (ТЕЦ).

Предметом дослідження є автоматизація регулювання та протиаварійного захисту турбоповітродувки турбінного цеху ТЕЦ металургійного комбінату.

У першому розділі проаналізовано предметну область автоматизації турбоповітродувних агрегатів. Надано загальну характеристику технологічного процесу підготовки дуття та наявної релейно-гідролінійної системи автоматизації агрегату у складі турбіни К-19-35 і компресора К-5500-42-1. Розглянуто явище помпажу та методи протипомпажного захисту, наведено аналіз рішень на аналогічних об'єктах.

У другому розділі проведено аналіз технологічного процесу як об'єкту автоматизації, визначено вхідні (керуючі та збудувальні) і вихідні (керовані) параметри об'єкту автоматизації, визначено задачі автоматичного контролю та регулювання відповідних технологічних параметрів, а також задачі технологічного захисту, обґрунтовано постановку задач автоматизації турбоповітродувного агрегату.

У третьому розділі обґрунтовано запропоновану трирівневу ієрархічну структуру системи автоматизації з виділеним контуром протиаварійного захисту; обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації для спроектованої САР; виконано проектування контуру регулювання частоти обертання турбіни із синтезом ПІД-регулятора за критерієм ІТАЕ; розроблено алгоритмічне забезпечення системи автоматизації у вигляді кінцевого автомата станів.

У четвертому розділі відповідними розрахунками підтверджено економічну доцільність впровадження запропонованої системи автоматизації.

У п'ятому розділі наведено аналіз небезпечних і шкідливих факторів виробництва та рекомендації щодо поліпшення умов праці інженерів АСУ ТП ділянки, виконано розрахунок захисного заземлення шафи ПЛК.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТУРБОПОВІТРОДУВКА, ПРОТИПОМПАЖНИЙ ЗАХИСТ, АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, ПРОТИАВАРІЙНИЙ ЗАХИСТ, ЧАСТОТА ОБЕРТАННЯ, ДОМЕННА ПІЧ.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	9
1.1 Характеристика об'єкта автоматизації та технологічного процесу	9
1.1.1 Склад та основні характеристики агрегату	9
1.1.2 Опис технологічного процесу	10
1.2 Огляд існуючих систем автоматичного регулювання і захисту турбокомпресорних агрегатів.....	10
1.2.1 Явище помпажу та методи протипомпажного захисту.....	11
1.2.2 Сучасні мікропроцесорні засоби автоматизації та діагностики	13
1.2.3 Аналіз існуючої системи автоматичного регулювання.....	13
2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ	16
2.1 Технологічний процес як об'єкт автоматизації.....	16
2.1.1 Вхідні (керуючі та збурювальні впливи) параметри	16
2.1.2 Вихідні (керовані) параметри.....	17
2.2 Завдання автоматизації	17
2.2.1 Завдання автоматичного контролю.....	18
2.2.2 Завдання автоматичного регулювання.....	18
2.2.3 Завдання технологічного захисту.....	19
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	20
3.1 Обґрунтування структури системи автоматизації.....	20
3.2 Польовий рівень системи автоматизації	22
3.2.1 Засоби вимірювальної техніки та первинні перетворювачі.....	22
3.2.2 Виконавчі механізми та регулюючі органи.....	23
3.3 Контролерний рівень	23
3.4 Підсистема протиаварійного захисту (ПАЗ).....	24
3.4.1 Склад та принципи функціонування ПАЗ.....	24
3.5 Вибір технічних засобів автоматизації	25
3.5.1 Технічні засоби польового рівня.....	25
3.5.2 Технічні засоби контролерного рівня	26
3.5.3 Технічні засоби рівня протиаварійного захисту	27
3.5.4 Технічні засоби рівня людино-машинного інтерфейсу.....	27
3.6 Проєктування системи автоматичного регулювання частоти обертання турбіни.....	27
3.6.1 Обґрунтування вибору регульованого параметра	27
3.6.2 Вимоги до діапазону, швидкості зміни параметра та якості перехідного процесу	28
3.6.3 Розрахунок параметрів настройки регулятора	29



3.6.4 Вибір контрольно-вимірювальних приладів та технічних засобів автоматизації контуру.....	32
3.6.5 Забезпечення безударного переходу між режимами керування	33
3.7 Програмна реалізація системи автоматичного регулювання	34
3.7.1 Алгоритм роботи САР у вигляді кінцевого автомата.....	34
3.7.2 Спосіб реалізації алгоритму засобами контролера.....	35
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ	37
4.1 Технологічне обґрунтування розрахункової потужності	37
4.2 Ринкові показники	37
4.3 Розрахунок втрат при простой.....	37
4.4 Енергетичний фактор	38
4.5 Висновок	38
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	39
5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	39
5.2 Технічні та організаційні рішення з безпеки	39
5.2.1 Захист від шуму, вібрації та теплових випромінювань.....	40
5.2.2 Ергономіка та організація робочого місця оператора	40
5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях та цивільний захист	40
5.3.1 Логіка протиаварійного захисту (ПАЗ).....	40
5.3.2 Пожежна безпека	40
5.3.3 Дії персоналу при оголошенні повітряної тривоги	41
5.3.4 Розрахунок захисного заземлення шафи ПЛК АСРіЗ	41
ВИСНОВКИ	43
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45


ВСТУП

Надійне та безперебійне забезпечення технологічним дуттям доменного цеху є базовою умовою стабільної роботи всього комплексу металургійного комбінату. Головним агрегатом, що виконує це завдання, є турбоповітродувка ст. №1 турбінного цеху ТЕЦ. Турбоповітродувка є складним, динамічним та енергоємним об'єктом керування. Існуючі системи автоматизації часто фізично та морально застарівають, що підвищує ризики виникнення аварійних режимів, зокрема помпажу, та знижує загальну енергоефективність. Модернізація автоматичної системи регулювання та захисту (АСРіЗ) на базі сучасних мікропроцесорних контролерів дозволяє забезпечити надійність агрегату, оптимізувати витрати енергоресурсів та гарантувати точність підтримання тиску й витрати повітря.

Метою дипломного проєкту є модернізація системи автоматизації та захисту турбоповітродувки турбінного цеху ТЕЦ металургійного комбінату для підвищення надійності її роботи, оптимізації керування продуктивністю компресора та забезпечення гарантованого протипомпажного захисту.

Завдання:

- підвищення надійності та надійність турбоагрегату за рахунок мінімізації ризиків виникнення аеродинамічного помпажу компресора та аварійного розгону парової турбіни;
- підвищення якості та оперативності керування складним енерготехнологічним об'єктом завдяки застосуванню сучасних високопродуктивних мікропроцесорних контролерів і розподіленої периферії;
- зменшення матеріальних та енергетичних витрат шляхом оптимізації витрати гострої пари на привод турбіни та виключення невиправданих скидів стисненого повітря в атмосферу;
- запобігання аварійним ситуаціям та позаплановим зупинкам ТПД, що виключає ризик аварійного припинення подачі дуття на доменні печі комбінату;
- стабілізацію заданих режимів технологічного процесу шляхом автоматичного контролю та регулювання частоти обертання парової турбіни, тиску та об'ємної витрати повітря в магістралі холодного дуття, а також видачі керуючих впливів на виконавчі механізми в автоматичному або дистанційному (операторському) режимах;
- ефективний та швидкодіючий протипомпажний захист компресора на основі безперервного обчислення відстані до межі помпажу та своєчасного автоматичного відкриття скидного клапана;
- контроль стану окремих вузлів агрегату (температура та вібрація підшипників, параметри масляної системи, тиск і температура гострої



пари) із забезпеченням світлової та звукової сигналізації при спрацюванні технологічних блокувань та аварійних захистів.

Об'єктом автоматизації є турбоповітродувка (ТПД) турбінного цеху теплоелектроцентралі (ТЕЦ). Турбоповітродувка забезпечує безперервне стиснення та подачу атмосферного повітря (технологічного дуття) заданих параметрів до доменних печей підприємства, що є базовою умовою стабільності всього металургійного процесу.

Предмет – система автоматизації та захисту турбоповітродувки турбінного цеху ТЕЦ металургійного комбінату.

Цілями модернізації системи автоматизації є:

- підвищення надійності та безпеки роботи турбоповітродувного агрегату шляхом впровадження сучасних засобів автоматизації та протиаварійного захисту;
- забезпечення стабільного підтримання технологічних параметрів процесу, зокрема витрати та тиску дуття, відповідно до вимог технологічного режиму доменного виробництва;
- підвищення точності автоматичного регулювання частоти обертання турбіни та продуктивності компресора;
- запобігання виникненню помпажних режимів роботи компресора шляхом реалізації швидкодіючої системи протипомпажного захисту та регулювання;
- зниження ризику аварійних ситуацій, пов'язаних із розгоном ротора, підвищеною вібрацією, осьовим зсувом валу та іншими небезпечними режимами роботи обладнання;
- підвищення оперативності контролю та керування технологічним процесом за рахунок використання сучасних програмованих логічних контролерів, засобів візуалізації та автоматизованих робочих місць операторів;
- забезпечення безперервного моніторингу технічного стану агрегату та раннього виявлення несправностей на основі системи вібродіагностики та контролю технологічних параметрів;
- забезпечення збору, архівування та аналізу технологічної інформації для підвищення ефективності експлуатації обладнання та планування ремонтних робіт;
- підвищення енергоефективності роботи турбоповітродувного агрегату шляхом оптимізації режимів його експлуатації та зменшення непродуктивних втрат енергії.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Турбоповітродувні агрегати (ТПД) посідають особливе місце серед енергетичного обладнання металургійних комбінатів, оскільки саме вони забезпечують безперервну подачу технологічного дуття до доменних печей.

Будь-яка непланова зупинка ТПД призводить до порушення теплового та газодинамічного режиму доменної плавки, що супроводжується значними економічними втратами та підвищеним ризиком аварій [1]. Тому питання автоматизації керування й захисту таких агрегатів традиційно перебуває в центрі уваги як виробничників, так і дослідників у галузі промислової автоматики.

1.1 Характеристика об'єкта автоматизації та технологічного процесу

1.1.1 Склад та основні характеристики агрегату

Турбоповітродувка є єдиним агрегатом, що конструктивно складається з приводної та компресорної частин, а також комплексу допоміжних систем, які забезпечують його життєдіяльність.


Приводна парова турбіна типу К-19-35 використовується як первинний двигун. Працює на перегрітій (гострій) парі високого тиску з колектору ТЕЦ. Енергія пари перетворюється на кінетичну енергію обертання ротора. Принцип дії полягає в наступному: енергія розширення пари в проточній частині турбіни перетворюється на кінетичну енергію обертання ротора.

Регулювання здійснюється зміною частоти обертання шляхом переміщення регулюючих клапанів (РК) подачі пари на сопла турбіни за допомогою сервомоторів системи гідрокерування.

Захист для аварійної зупинки (при перевищенні обертів або падінні тиску мастила) турбіна оснащена стопорним клапаном, який миттєво перекриває доступ пари.

Відцентровий компресор (нагнітач) типу К-5500-42-1 призначений для засмоктування, фільтрації та багатоступеневого стиснення повітря. Ротор компресора жорстко з'єднаний із валом турбіни за допомогою гнучкої муфти, тому його продуктивність повністю визначається обертами турбіни. Принцип дії полягає в наступному: повітря через всмоктувальний патрубок потрапляє на лопатки робочих коліс ротора, де за рахунок відцентрової сили набуває швидкості, яка у дифузорах перетворюється на статичний тиск.

Особливістю є те, що нагнітач жорстко з'єднаний із валом турбіни за допомогою гнучкої муфти, тому його продуктивність повністю визначається частотою обертання турбіни.



Система змащення та гідрокерування (масляна система) подає мастило під тиском для змащення підшипників ковзання агрегату та живлення гідравлічних сервомоторів клапанів пари.

Конденсаційна установка складається з поверхневого конденсатора, ежекторів та конденсаційних насосів. Створює глибокий вакуум на вихлопі турбіни для підвищення її ККД.

Протипомпажний контур включає швидкісний протипомпажний клапан (ППК), встановлений на байпасній лінії нагнітання. У разі зниження витрати повітря через компресор нижче критичної межі, ППК автоматично відкривається і скидає надлишок повітря в атмосферу (або на вхід), запобігаючи руйнуванню агрегату [2].

1.1.2 Опис технологічного процесу


Технологічний процес підготовки дуття турбоповітродувним агрегатом базується на термодинамічних та аеродинамічних законах стиснення газу (повітря) за рахунок механічної енергії, що передається від паротурбінного привода. Цей процес є безперервним, динамічним та взаємопов'язаним, оскільки зміна режиму роботи одного вузла миттєво впливає на стан усього агрегату та суміжних технологічних цехів (ТЕЦ і доменного).

Сутність технологічного процесу полягає у забезпеченні безперервного, надійного та економічно ефективного постачання доменних печей металургійного підприємства технологічним повітряним дуттям із чітко заданими параметрами тиску та об'ємної витрати. Стабільність цих параметрів безпосередньо визначає хід доменної плавки.

Атмосферне повітря засмоктується компресором, де внаслідок швидкісного обертання робочих коліс ротора відбувається його багатоступеневе стиснення. Приводом відцентрового компресора виступає парова турбіна. Гостра перегріта пара з магістралі ТЕЦ розширюється в проточній частині турбіни, здійснюючи механічну роботу і змушуючи ротор обертатися. Оскільки вали турбіни та компресора жорстко з'єднані, частота обертання турбіни безпосередньо визначає кінетичну енергію, що передається повітряному потоку, а отже - кінцеву продуктивність і тиск нагнітання всього агрегату [2].

1.2 Огляд існуючих систем автоматичного регулювання і захисту турбокомпресорних агрегатів

Історично першими засобами регулювання турбоповітродувок були електрогідравлічні та електропневматичні системи на базі аналогових регуляторів (типу ЕГСР, РСНБ та подібних), що реалізовували ПІД-закон керування частотою обертання турбіни й тиском дуття через механічні чи гідравлічні сервомотори. Такі системи відрізнялись простотою, проте мали обмежену точність, низьку швидкодію захисних функцій і практично



не підлягали гнучкому переналаштуванню без втручання в апаратну частину [1].

У роботах, присвячених модернізації автоматизованих систем керування технологічними процесами, зазначається, що основними причинами заміни застарілих систем є фізичне старіння контролерів і панелей оператора, припинення випуску запасних частин виробником, а також необхідність розширення функціональності – додавання нових датчиків, зміни способу передачі даних і розширення мережі диспетчеризації [3, 4].


Сучасний підхід до побудови АСРіЗ турбокомпресорних агрегатів для металургійних виробництв базується на застосуванні програмно-технічних комплексів із розподіленою архітектурою, що включають ПЛК нижнього рівня, мережеву периферію збору сигналів, автоматизовані робочі місця (АРМ) оператора та засоби диспетчеризації верхнього рівня [3, 4].

Серед наявних рішень провідні позиції утримують програмно-апаратні комплекси на базі Siemens SIMATIC S7 / PCS 7 (Neo), у складі яких реалізовано спеціалізований пакет Siemens Turbomachinery Applications (STA), що інтегрується безпосередньо в існуючий контролер без додаткового обладнання та забезпечує функції протипомпажного регулювання, віддалену діагностику та збір даних для аналізу тенденцій технічного стану агрегату [6]. Подібні комплексні рішення для керування турбокомпресорними агрегатами - включно з протипомпажним регулюванням, керуванням продуктивністю та розподілом навантаження - пропонує також компанія Schneider Electric [7], що свідчить про загальну тенденцію переходу від спеціалізованих аналогових регуляторів до уніфікованих програмних модулів протиаварійного захисту, які працюють на стандартних промислових ПЛК.

Аналіз цих систем-аналогів дозволяє виділити спільну архітектурну тенденцію: відокремлення функцій регулювання продуктивності (підтримання заданого тиску/витрати дуття) від функцій протипомпажного захисту, які реалізуються як окремий швидкодіючий контур з мінімальним часом реакції на критичні відхилення режиму.

1.2.1 Явище помпажу та методи протипомпажного захисту

Помпаж – це нестійкий автоколивальний режим роботи відцентрового компресора, що виникає за різкого зменшення витрати повітря нижче критичного значення для даного тиску нагнітання. Явище супроводжується зривом потоку в проточній частині, стрибкоподібною зміною витрати від максимального значення до зворотного, високочастотними пульсаціями тиску, підвищеною вібрацією та різкою зміною осьового зусилля на роторі [1]. Розвинений помпаж здатний протягом короткого часу призвести до руйнування підшипникових вузлів, лабіринтових ущільнень і навіть до механічного пошкодження лопаткового апарату [8].



Класичний підхід до побудови протипомпажного регулятора полягає у визначенні розрахункової межі помпажу (як функції перепаду тиску на конфузори або діафрагмі всмоктувального тракту від витрати повітря) та формуванні лінії регулювання з гарантованим запасом - як правило, не менше 10% – від цієї межі [1]. Коли робоча точка компресора наближається до лінії регулювання, протипомпажний регулятор починає відкривати скидний (байпасний) клапан, відводячи частину стиснутого повітря в атмосферу або на всмоктування, тим самим штучно збільшуючи витрату через компресор і відводячи робочу точку від межі нестійкості [8].

Згідно з українським патентом на корисну модель, відомий спосіб антипомпажного регулювання базується на вимірюванні тиску й температури газу на вході та виході компресора, перепаду тиску на мірній шайбі та частоти обертання ротора, за якими обчислюється положення робочої точки компресора на його газодинамічній характеристиці; для підвищення точності, економічності та ефективності регулювання запропоновано перетворювати різницю між заданням і змінною регулювання за попередньо заданою функцією залежно від положення цієї робочої точки [5].

Окремим напрямом підвищення ефективності протипомпажного захисту є застосування змішаних систем, що поєднують антипомпажний клапан і систему байпасування: за результатами математичного моделювання динаміки електромеханічної системи «відцентровий компресор - антипомпажний клапан - приводний двигун» встановлено, що змішана система дозволяє стабілізувати робочу точку компресора без надмірного наближення до передпомпажної лінії, що забезпечує роботу агрегату з більшим коефіцієнтом корисної дії за заданої витрати газу [1].

У сучасних мікропроцесорних системах протипомпажний регулятор реалізується програмно на базі ПІД-закону з динамічним зсувом лінії регулювання залежно від робочої точки компресора, тобто коефіцієнти регулятора змінюються нелінійно за картою компресора, що дозволяє підтримувати мінімально необхідний запас до межі помпажу без надлишкових скидів повітря в атмосферу [6]. Узагальнено в технічній літературі зазначається, що для реалізації протипомпажного захисту необхідні щонайменше дані про тиск і температуру всмоктування та нагнітання, а також перепад тиску, пропорційний об'ємній витраті газу через компресор [8].

Узагальнюючи проаналізовані джерела [1-8], можна констатувати, що ефективність протипомпажного захисту визначається трьома ключовими факторами: швидкодією контуру вимірювання та обчислення відстані до межі помпажу, швидкістю спрацювання виконавчого (скидного) клапана та точністю математичної моделі межі помпажу для конкретного компресора в усьому діапазоні робочих режимів.

1.2.2 Сучасні мікропроцесорні засоби автоматизації та діагностики

Перехід від аналогових і релейних схем до мікропроцесорних контролерів дозволив істотно розширити функціональність систем АСПЗ. Сучасні ПЛК забезпечують не лише реалізацію законів регулювання, а й виконання складних алгоритмів технологічних блокувань, ведення архівів технологічних параметрів, інтеграцію з SCADA-системами верхнього рівня та обмін даними за промисловими протоколами з суміжними підсистемами - приводами, панелями оператора, системами вібродіагностики [3, 4].

Окремим важливим напрямом є системи безперервного контролю вібраційного стану підшипникових вузлів турбоагрегату. Допустимі рівні вібрації для великих стаціонарних парових турбін і генераторів номінальною потужністю від 15 МВт регламентуються національним стандартом [9], який встановлює зони оцінки технічного стану агрегату за середньоквадратичним значенням віброшвидкості, виміряної на необертюваних частинах машини.

Досвід комплексної модернізації автоматизованих систем управління технологічними процесами на металургійних підприємствах України показує, що підвищення ефективності та надійності функціонування технологічного комплексу досягається саме за рахунок поєднання сучасних мікропроцесорних засобів регулювання з функціями діагностики технічного стану обладнання [4].


Таким чином, сучасна тенденція полягає в об'єднанні в межах єдиного програмно-технічного комплексу функцій регулювання продуктивності, протипомпажного захисту, технологічних блокувань і вібродіагностики, що відповідає завданням, поставленим у кваліфікаційній роботі.

1.2.3 Аналіз існуючої системи автоматичного регулювання

Діюча на базі практики система автоматичного регулювання та захисту ТПД ст. №1 була сформована ще на етапі введення агрегату в експлуатацію. Вона базується на поєднанні застарілих гідравлічних, електромеханічних та аналогових засобів керування.

Проведений під час переддипломної практики аналіз виявив низку критичних недоліків та проблем, які унеможливають її подальшу безпечну й ефективну експлуатацію:

- висока інерційність гідравлічного регулятора швидкості: Керування обертами турбіни виконується повністю за рахунок механіко-гідравлічних зв'язків. Через накопичення люфтів та гідравлічне запізнення реакція системи на динамічні збурення відбувається із запізненням, що ускладнює стабілізацію обертів під час пусконаладжувальних та перехідних режимів;



- відсутність автоматичного контуру регулювання дуття: Регулювання витрати повітря та тиску нагнітання компресора не має автоматизованого контуру - більшість операцій виконується машиністом вручну. Це призводить до надмірних коливань витрати технологічного дуття (в межах до 60м³/хв), що негативно впливає на стабільність ходу доменної плавки;

- низька ефективність та запізнення протипомпажного захисту: Існуючий протипомпажний захист побудований на базі застарілих гідравлічних пристроїв з низькою швидкодією. Щоб гарантовано уникнути помпажу, оперативний персонал змушений штучно підтримувати завищену мінімальну витрату повітря (завищений запас безпеки). Це призводить до постійного перевитрачання енергоресурсів та зниження загального ККД турбоагрегату;

- критична залежність від імпорту запчастин: Елементна база існуючої системи регулювання та автоматики безпеки була виготовлена на підприємствах РФ. На сьогодні постачання оригінальних запасних частин та сервісне обслуговування є повністю неможливими, що ставить під загрозу працездатність стратегічного для комбінату агрегату;

- локальний та обмежений характер інформаційного забезпечення: Контроль параметрів здійснюється за допомогою щитових аналогових приладів за місцем. Система не забезпечує централізованої візуалізації, автоматичної архівації даних, побудови трендів та ведення хронологічного журналу подій, що унеможлиблює якісну діагностику передаварійних станів;

- роз'єднаність систем регулювання та протиаварійного захисту (ПАЗ): Захист від розгону (перевищення обертів), осьового зсуву та вібрації реалізований на автономних релейних та електромеханічних пристроях. Вони функціонують окремо від контурів регулювання, що знижує загальну надійність та заважає координувати дії автоматики при виникненні небезпечних режимів.

Функціональна структура існуючої (застарілої) системи:

- об'єкт керування: турбіна К-19-35-1, компресор К-5500-42-1, допоміжні системи мастила й ущільнень;

- засоби вимірювання: механічні манометри, технічні термометри, дифманометри та механічні тахометри;


- регулюючі пристрої: гідравлічний регулятор швидкості, гідроприводи регулюючого та протипомпажного клапанів;

- захист: механічний центробіжний бойковий вимикач (автомат безпеки), реле осьового зсуву, автономні реле вібрації;

- людино-машинний інтерфейс: стрілочні прилади, сигнальні табло, фізичні кнопки та перемикачі на місцевому щиті ТЕЦ.

У підсумку існуюча система автоматичного регулювання турбоповітродувки характеризувалась:

- недостатньою швидкодією та точністю регулювання;

- 
- високою залежністю від ручного керування;
 - обмеженими інформаційними можливостями;
 - підвищеним ризиком помпажних та аварійних режимів;
 - складністю технічного обслуговування через застарілу елементну базу.

Зазначені недоліки обумовили необхідність глибокої реконструкції системи автоматизації з переходом на сучасні програмно технічні комплекси, що реалізують інтегроване регулювання, захист та інформаційну підтримку експлуатації.

Висновки за результатами аналізу:


- існуючі аналогові та релейні системи регулювання турбоповітродувок (типу ЕГСП, РСНБ) морально й фізично застаріли, мають обмежену точність та низьку швидкодію захисних функцій;

- провідні закордонні рішення (Siemens STA на базі SIMATIC S7/PCS 7, рішення Schneider Electric для турбомашин) демонструють перехід до розподілених мікропроцесорних архітектур із виокремленням швидкодіючого контуру протипомпажного захисту;

- ефективність протипомпажного захисту визначається швидкістю вимірювального контуру, точністю математичної моделі межі помпажу та швидкістю реакції скидного клапана, а не лише законом регулювання як таким;

- перспективним напрямом є інтеграція функцій регулювання продуктивності, протипомпажного захисту, технологічних блокувань і неперервної вібродіагностики підшипникових вузлів у межах єдиного програмно-технічного комплексу;

- отримані результати аналізу підтверджують актуальність модернізації САРiЗ турбоповітродувки турбінного цеху ТЕЦ на базі сучасних мікропроцесорних контролерів і обґрунтовують напрями подальшої розробки, визначені метою та завданнями кваліфікаційної роботи.



2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СТРУКТУРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

2.1 Технологічний процес як об'єкт автоматизації

Турбоповітродувка (ТПД) турбінного цеху ТЕЦ металургійного підприємства є складним енерготехнологічним об'єктом автоматизації із взаємопов'язаними технологічними параметрами. Головне призначення об'єкта - безперервне забезпечення доменного цеху стисненим повітрям (технологічним дуттям) із заданими показниками тиску та витрати.

Як об'єкт керування ТПД характеризується високою динамічністю процесів, нелінійністю характеристик та наявністю критично небезпечних режимів роботи (помпажу).

2.1.1 Вхідні (керуючі та збурювальні впливи) параметри

Вхідні керуючі впливи являють собою параметри, зміна яких забезпечує безпосередній вплив системи автоматизації на об'єкт керування з метою підтримання заданого технологічного режиму. До них відносять:

- витрату робочої пари, що подається на турбіну, — основний спосіб регулювання частоти обертання ротора (продуктивності турбокомпресора);


- ступінь відкриття протипомпажного (байпасного) клапана - використовується для відведення частини стисненого повітря на рециркуляцію або в атмосферу при виникненні загрози помпажу. Це дозволяє штучно збільшити витрату повітря через компресор та забезпечити його повернення до області стійкої роботи;

- положення напрямного апарата компресора (за наявності регульованих напрямних лопаток) - додатковий канал керування продуктивністю та ступенем стиснення компресора за сталої частоти обертання ротора.

Вхідні збурювальні впливи (збурення) являють собою фактори зовнішнього середовища та суміжних технологічних процесів, які викликають відхилення параметрів роботи агрегату від заданих значень. До них відносять:

- зміну протитиску з боку доменної печі - опір шихти в доменній печі змінюється внаслідок переміщення матеріалів та газодинамічних процесів, що призводить до коливань тиску в нагнітальному трубопроводі;

- параметри атмосферного повітря на всмоктуванні - температура, відносна вологість і барометричний тиск навколишнього середовища впливають на густину повітря, а отже, на енергетичні та газодинамічні характеристики компресора;

- 
- параметри гострої пари перед турбіною (тиск і температура) - їх коливання змінюють наявний теплоперепад у турбіні, що впливає на її потужність і частоту обертання ротора компресора;
 - ступінь забруднення повітряних фільтрів - збільшення гідравлічного опору фільтрів зумовлює зниження тиску повітря на вході до компресора та погіршення умов його роботи.

2.1.2 Вихідні (керовані) параметри

Вихідні керовані параметри (контрольовані величини) характеризують стан технологічного процесу та підлягають контролю або автоматичному регулюванню. До них відносять:


- витрату повітря, що подається до доменної печі, - основний технологічний параметр, стабілізація якого забезпечує підтримання необхідного режиму доменної плавки;
- тиск повітря в нагнітальному колекторі (тиск дуття) - контролюється для забезпечення необхідного режиму роботи доменної печі та недопущення перевантаження компресорного обладнання;
- частоту обертання ротора турбокомпресора - проміжний регульований параметр, значення якого підтримується автоматичною системою регулювання турбіни;
- положення робочої точки на газодинамічній характеристиці компресора - розрахунковий параметр, що визначається за співвідношенням витрати та ступеня стиснення і характеризує запас стійкості компресора відносно межі помпажу;
- вібрацію та осьовий зсув валу - параметри механічної безпеки та діагностики стану турбоагрегату; перевищення допустимих меж вібрації підшипників або критичний осьовий зсув ротора свідчать про аварійний стан (наприклад, початок помпажу або руйнування затяжки підшипників) і потребують миттєвої активації технологічного захисту на зупинку агрегату.

Окремо слід виділити перепад тиску на пристроях вимірювання витрати (звужуючих пристроях) - первинний динамічний сигнал, на основі якого обчислювальний процесор ПЛК у реальному часі розраховує фактичну об'ємну витрату повітря, зведену до нормальних умов. Цей розрахунок критично важливий як для контролю продуктивності, так і для роботи алгоритму протипомпажного захисту.

2.2 Завдання автоматизації

Основними завданнями автоматизації цього об'єкта є забезпечення скоординованого керування паротурбінним приводом та компресорною частиною для оптимізації споживання пари й гарантованого захисту обладнання, зокрема:

- стабільна та безперервна робота турбоповітродувки в усьому діапазоні технологічних режимів;
- мінімізація ризиків аварійних зупинок і пошкодження обладнання;

- 
- зниження питомих енергетичних витрат;
 - зменшення залежності технологічного процесу від ручного втручання оператора.

Відповідно до характеру вирішуваних задач їх можна поділити на завдання автоматичного контролю та завдання автоматичного регулювання.

2.2.1 Завдання автоматичного контролю


Завдання автоматичного контролю передбачають безперервне вимірювання, відображення та реєстрацію технологічних параметрів без безпосереднього впливу на об'єкт, зокрема:

- контроль частоти обертання ротора турбіни для своєчасного виявлення відхилень від допустимого діапазону та запобігання небезпечному розгону валу;
- контроль тиску та температури гострої пари перед турбіною, а також тиску відпрацьованої пари (у конденсаторі) для оцінки енергетичного потенціалу робочого тіла;
- контроль перепаду тиску на звужуючому пристрої з подальшим обчисленням фактичної витрати повітря, зведеної до нормальних умов, — для оцінки продуктивності компресора та роботи алгоритму протипомпажного захисту;
- контроль параметрів атмосферного повітря на всмоктуванні (температура, вологість, барометричний тиск) для врахування їхнього впливу на густину повітря та характеристики компресора;
- контроль ступеня забруднення повітряних фільтрів (за перепадом тиску на них) для своєчасного інформування про необхідність обслуговування;
- контроль вібрації підшипників та осьового зсуву ротора турбоагрегату для діагностики механічного стану обладнання;
- контроль положення робочої точки на газодинамічній характеристиці компресора відносно межі помпажу - розрахунковий параметр запасу стійкості.

2.2.2 Завдання автоматичного регулювання

Завдання автоматичного регулювання передбачають активний вплив на об'єкт керування з метою підтримання заданих значень технологічних параметрів, зокрема:

- автоматичне регулювання частоти обертання ротора турбіни (продуктивності турбокомпресора) шляхом зміни витрати робочої пари, що подається на турбіну;
- автоматичне регулювання тиску повітря в нагнітальному колекторі (тиску дуття) та витрати повітря, що подається до доменної печі, відповідно до поточного завдання технологічного регламенту печі;

- 
- автоматичне протипомпажне регулювання шляхом зміни ступеня відкриття протипомпажного (байпасного) клапана при наближенні робочої точки компресора до межі помпажу;
 - автоматичне регулювання продуктивності та ступеня стиснення компресора шляхом зміни положення напрямного апарата (за наявності регульованих напрямних лопаток) як додаткового каналу впливу за сталої частоти обертання ротора.

2.2.3 Завдання технологічного захисту

Технологічний захист агрегату — автоматична зупинка турбоповітродувки при перевищенні допустимих меж вібрації або осьового зсуву ротора, що сигналізує про аварійний режим (зокрема, розвиток помпажу чи руйнування підшипникових вузлів).

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Запропонована система автоматизації турбоповітродувки ст. №1 (ТПД-1) турбінного цеху ТЕЦ металургійного підприємства спроектована як багаторівнева ієрархічна автоматизована система керування технологічним процесом (АСК ТП). Вона інтегрує в єдиному програмно-технічному комплексі (ПТК) контури безперервного автоматичного регулювання, алгоритми дискретної логіки й блокувань, апаратно виділену систему протиаварійного захисту (ПАЗ), а також засоби візуалізації.

Під час розробки загальної структури та топології системи було враховано специфічні особливості об'єкта автоматизації:

- високу динамічність та теплову інерційність турбокомпресорного агрегату К-19-35 / К-5500-42-1;
- жорсткі вимоги до безперервності та стабільності подачі кисневого дуття до доменних печей;
- необхідність забезпечення найвищого рівня функціональної безпеки для запобігання помпажним явищам та механічному розгону ротора;
- сучасні міжнародні та галузеві стандарти побудови відкритих промислових систем автоматизації.

3.1 Обґрунтування структури системи автоматизації

В основу архітектури ПТК покладено класичну ієрархічну трирівневу модель промислових АСУ ТП, яку доповнено функціонально та апаратно незалежним контуром протиаварійного захисту. Вибір саме такої структури обумовлений сукупністю вимог, що впливають як з особливостей об'єкта автоматизації, так і з нормативних вимог до систем керування турбокомпресорними агрегатами підвищеної небезпеки.

По-перше, розділення системи на польовий, контролерний рівень та рівень людино-машинного інтерфейсу відповідає загальноприйнятій практиці побудови АСУ ТП на базі промислових контролерів і забезпечує функціональну незалежність кожного рівня: відмова чи планове обслуговування засобів верхнього рівня (SCADA, АРМ оператора) не впливає на виконання контролером алгоритмів регулювання та блокувань, а зміна чи розширення складу польового обладнання не потребує перепрограмування верхніх рівнів. Така структура також відповідає вимогам Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу щодо побудови відкритих, масштабованих систем автоматизації на уніфікованій технічній базі.

По-друге, виділення підсистеми протиаварійного захисту в окремий, апаратно незалежний від загальнотехнологічного контролера контур є прямим наслідком вимог функціональної безпеки до об'єктів з підвищеним рівнем небезпеки, до яких належить турбокомпресорний агрегат. Турбіна

К-19-35 та компресор К-5500-42-1 характеризуються двома специфічними видами аварійних явищ - механічним розгоном ротора понад безпечну межу обертів та газодинамічним явищем помпажу компресора - кожне з яких здатне призвести до руйнування обладнання за частки секунди. Покладання функції захисту від цих явищ на загальнотехнологічний ПЛК створювало б єдину точку відмови: збій програми, зависання мережі обміну даними чи відмова процесора одночасно позбавляли б систему і регулюючої, і захисної функції. Апаратне відокремлення каналу ПАЗ, що діє на пряму на стопорний клапан через власні релейні виходи, виключає таку залежність і гарантує виконання захисної дії незалежно від стану центрального контролера.

По-третє, прийнята структура забезпечує необхідне резервування вимірювальних каналів критичних параметрів (триканальне вимірювання частоти обертання за логікою «2 з 3», дубльовані канали вимірювання вібрації та осьового зсуву) без ускладнення архітектури системи в цілому: резервовані первинні перетворювачі підключаються паралельно до контролерного рівня (для цілей регулювання) та до рівня ПАЗ (для цілей захисту), що дозволяє уникнути дублювання первинних перетворювачів для різних задач.

Таким чином, обрана структура одночасно задовольняє вимоги до глибокого резервування та автономності критичних захисних функцій, масштабованості й відкритості системи на рівні регулювання та диспетчеризації, а також відповідає прийнятій галузевій практиці побудови систем автоматизації об'єктів підвищеної небезпеки металургійного виробництва. Деталізовану структуру та розподіл апаратних засобів за функціональними рівнями системи автоматизації наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Структурна організація та склад ПТК АСРіЗ турбоповітродувки

Рівень	Обладнання	Основні функції
Польовий рівень	Датчики тиску, температури, витрати	Безперервне вимірювання технологічних параметрів
	Датчики частоти обертання	Контроль швидкості ротора турбіни
	Датчики вібрації та осьового зсуву	Контроль механічного стану агрегату
	Електрогідравлічні сервоприводи	Реалізація керуючих впливів

Продовження табл. 3.1

Рівень	Обладнання	Основні функції
Рівень керування (PLC)	Контролери CompactLogix 5069	Реалізація алгоритмів АСП
	Модулі AI/DI/AO/DO	Обробка та передача сигналів
	Мережеве обладнання Ethernet/IP	Обмін даними між рівнями
Рівень ПАЗ	Модулі 1444-DYN	Швидкодіючий захист
	Автономні алгоритми АЗ	Захист незалежно від PLC
Рівень ЛМІ	АРМ оператора	Візуалізація та керування
	Інженерна станція	Налаштування та діагностика
Інтеграційний рівень	Сервери АСУ ТП	Архівація та диспетчеризація

3.2 Польовий рівень системи автоматизації


Польовий (нижній) рівень виконує функцію безпосереднього інтерфейсу між цифровою системою керування та фізичним технологічним процесом агрегату ТПД-1. На цьому рівні вирішуються задачі первинного перетворення технологічних координат у стандартизовані електричні сигнали та трансформації команд контролера у механічне переміщення регулюючих органів.

3.2.1 Засоби вимірювальної техніки та первинні перетворювачі

Для забезпечення високої точності, повторюваності та метрологічної стабільності контурів регулювання в проекті використано інтелектуальні датчики нового покоління. До складу первинних перетворювачів польового рівня входять:

- датчики тиску та перепаду тиску, що контролюють тиск гострої пари перед турбіною, тиск повітря на всмоктуванні та нагнітанні компресора, а також перепад тиску на трубі Вентурі для розрахунку об'ємної витрати; передача даних здійснюється завадостійкою токовою петлею 4–20 мА з накладеним цифровим протоколом HART [11];

- температурні перетворювачі для контролю теплового стану паровпускних частин, підшипників та повітряних патрубків — платинові термоперетворювачі опору (ТСП) з уніфікованим вихідним сигналом, вмонтовані безпосередньо у захисні гільзи;



- датчики механічних величин — безконтактні вихрострумові датчики (проксимітори) з підсилювачами-проксиміторами для контролю вібраційного стану (вібропереміщення, віброшвидкість) опорних підшипників та осьового зсуву валу;

- тахометричні датчики — три незалежні індукційні датчики швидкості, спрямовані на шестерню валу турбіни, для вимірювання частоти обертання ротора.

Для критично важливих технологічних параметрів (частота обертання ротора, тиск нагнітання, осьовий зсув валу) у проєкті реалізовано повне апаратне резервування каналів вимірювання (дублювання або потроєння датчиків), що дозволяє системі безвідмовно функціонувати навіть у разі повної відмови одного з первинних перетворювачів. Обґрунтування вибору конкретних типів первинних перетворювачів наведено в підрозділі 3.5.

3.2.2 Виконавчі механізми та регулюючі органи

Виконавчі пристрої польового рівня забезпечують точний та швидкісний динамічний вплив на об'єкт керування відповідно до команд контролерного рівня. Основними елементами є:

- електрогідравлічний сервопривод регулюючого клапана пари, що забезпечує точне позиціонування клапана, який дозує подачу гострої пари на сопла турбіни К-19-35, мінімізуючи люфти та зони нечутливості контуру регулювання швидкості;

- електрогідравлічний сервопривод протипомпажного клапана (ППК), встановлений на лінії байпасного скидання повітря в атмосферу; головною вимогою до цього вузла є надвисока швидкодія — час повного аварійного відкриття клапана за сигналом захисту становить менше 1,0 с, що гарантує миттєве розвантаження компресора за тиском і зрив помпажних коливань;


- електроприводи допоміжного обладнання, що забезпечують дистанційне та автоматичне керування запірними засувками на магістралях, пусковими маслonaсосами та вентиляторами охолодження.

Впровадження сучасних сервоприводів із вбудованими електронними позиціонерами дозволило досягти високої лінійності характеристик керування та виключити гідравлічні удари в системі.

3.3 Контролерний рівень

Центральною ланкою обробки інформації та формування керуючих впливів є високопродуктивний програмований логічний контролер (ПЛК) Allen-Bradley CompactLogix серії 5069 виробництва компанії Rockwell Automation. Контролерний рівень виконує такі ключові завдання:

- реалізація алгоритмів АСР - виконання обчислень багатоконтурних цифрових ПІД-регуляторів частоти обертання, тиску та



витрати дуття з високою частотою опитування каналів (цикл завдання регулятора не більше 10 мс);

- протипомпажне обчислення - безперервне визначення положення робочої точки компресора на площині параметрів «перепад тиску - витрата» відносно динамічної лінії помпажу;

- логіко-програмне керування - автоматична координація послідовності кроків під час пуску турбоагрегату (контроль прогріву, проходження зон критичних обертів валу), переходу між режимами та планового зупину;

- діагностика та зв'язок — збір даних від модулів вводу-виводу серії 5069, їх первинна фільтрація, масштабування, перевірка на достовірність («обрив лінії», «вихід за діапазон») та передача інформаційних масивів на верхній рівень резервованою гігабітною мережею EtherNet/IP з топологією «відкрите кільце» (DLR).

3.4 Підсистема протиаварійного захисту (ПАЗ)

Відповідно до сучасних норм проєктування вибухо- та пожежонебезпечних промислових об'єктів та вимог функціональної безпеки, підсистема ПАЗ реалізована як апаратно та програмно незалежний контур, відокремлений від загальнотехнологічного ПЛК. Вона побудована на базі спеціалізованих інтелектуальних модулів динамічного моніторингу Dynamix 1444-DYN (Rockwell Automation) [12].

3.4.1 Склад та принципи функціонування ПАЗ

Модулі Dynamix 1444-DYN підключені безпосередньо до первинних вихрострумів датчиків механічних величин та індукційних датчиків обертів. Вони мають власні високошвидкісні процесори та вбудовані сухі контакти релейних виходів. Підсистема ПАЗ безперервно виконує такі критичні функції захисту:

- захист від розгону турбіни - при перевищенні частотою обертання ротора граничного безпечно значення (3450 об/хв) модулі ПАЗ за логікою «2 з 3» миттєво формують команду на відсікання пари;

- захист за параметрами механічної безпеки - аварійний зупин агрегату при перевищенні допустимих порогів середньоквадратичного значення віброшвидкості підшипників або при критичному осьовому зсуві («розбігу») валу, що загрожує торканням робочих коліс об статор;

- контроль згасання вакууму - організація захисту при падінні розрідження в конденсаторі нижче критичної норми.

Принцип безумовної пріоритетності ПАЗ. Незалежність архітектури ПАЗ гарантує, що навіть у разі повної відмови центрального процесора головного ПЛК, зависання мережі передачі даних або знеструмлення шафи загальної автоматики модулі Dynamix 1444-DYN гарантовано виконують захисну функцію. Вони напряму розірвуть ланцюг живлення соленоїда безпеки, що призведе до миттєвого закриття стопорного

клапана пари та повного зупину турбоповітродувки, запобігаючи техногенній аварії.

3.5 Вибір технічних засобів автоматизації

У підрозділах 3.1–3.4 наведено опис архітектури системи та складу технічних засобів кожного рівня. У цьому підрозділі обґрунтовується вибір конкретних типів обладнання для всіх рівнів автоматизації з урахуванням специфіки об'єкта (висока швидкодія контурів захисту, агресивне середовище машинного залу, необхідність безперервної роботи протягом міжремонтного циклу), а також вимог чинного Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу щодо уніфікації номенклатури технічних засобів автоматизації (ТЗА) і контрольно-вимірювальних приладів (КВП), що застосовуються на підприємствах Групи. Згідно зі Стандартом перевага надається обладнанню провідних світових виробників з підтвердженою наявністю сервісних центрів та складів ЗІП на території України, відкритими промисловими протоколами обміну даними та можливістю подальшої уніфікації запасних частин у межах підприємства.

3.5.1 Технічні засоби польового рівня

До польового рівня належать первинні вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми, обґрунтування вибору яких наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Обґрунтування вибору технічних засобів польового рівня

Параметр / функція	Обране обладнання	Обґрунтування вибору	Відповідність Стандарту
Тиск, перепад тиску (пара, повітря)	Rosemount 3051	Похибка $\pm 0,065$ %, протокол HART, інтелектуальна самодіагностика, можливість дистанційного перенастроювання діапазону	Внесено до переліку рекомендованих КВП Стандарту АСУ ТП для контурів тиску/витрати
Температура (підшипники, пара, повітря)	ТСП (Pt100) у захисних гільзах	Уніфікований сигнал опору, висока надійність, низька вартість обслуговування, відсутність активної електроніки в зоні високих температур	Типове рішення для турбінного обладнання за Стандартом

Продовження табл. 3.2

Вібрація, осьовий зсув ротора	Вихроструміві датчики (проксимітори) підсилювачами-проксиміторами	3	Безконтактний принцип вимірювання, придатність до жорстких умов машинного залу, сумісність із модулями Dynamix 1444-DYN	Обов'язкове резервування каналу за вимогами функціональної безпеки
Частота обертання ротора	Індукційні тахометричні датчики (3 шт., мажоритарна схема)		Висока надійність, відсутність рухомих контактів, можливість реалізації логіки «2 з 3»	Триканальне резервування критичного параметра відповідно до вимог ПАЗ
Регулювання подачі пари на турбіну	Електрогідравлічний сервопривод регулюючого клапана		Висока швидкодія та лінійність порівняно з механіко-гідравлічною буксою, вбудований електронний позиціонер	Заміна застарілого виконавчого механізму відповідно до технічного завдання модернізації
Протипомпажний захист (скидання повітря)	Електрогідравлічний сервопривод протипомпажного клапана		Час повного відкриття менше 1,0 с, що задовольняє вимогу до швидкодії протипомпажного захисту	Критична вимога функціональної безпеки компресорного агрегату


3.5.2 Технічні засоби контролерного рівня

Як центральний контролер обрано програмований логічний контролер Allen-Bradley CompactLogix 5069 (Rockwell Automation). Вибір обумовлений такими факторами:

- стандарт АСУ ТП Метінвест Холдингу визначає Rockwell Automation одним із пріоритетних постачальників ПЛК-обладнання для підприємств Групи, що забезпечує уніфікацію закладеного парку контролерів, наявність регіональних сервісних центрів та сумісність із вже впровадженими на ТЕЦ системами;

- архітектура CompactLogix 5069 підтримує модульне масштабування входів/виходів (AI/DI/AO/DO) без зупину виробництва при подальшому розширенні системи;

- вбудована підтримка відкритого промислового протоколу EtherNet/IP з топологією резервованого кільця (DLR) забезпечує необхідну живучість мережі обміну даними між рівнями АСК ТП;



– середовище розробки Studio 5000 Logix Designer відповідає стандарту IEC 61131-3, що дозволяє реалізувати контури регулювання мовою функціональних блоків (FBD), а логіку пуску й блокувань - мовами LD та ST, відповідно до прийнятої в компанії практики програмування;

– цикл опитування каналів контролера (не більше 10 мс) задовольняє вимоги до швидкодії багатоконтурного цифрового регулювання частоти обертання, тиску та витрати дуття.

3.5.3 Технічні засоби рівня протиаварійного захисту

Для підсистеми ПАЗ обрано спеціалізовані модулі динамічного моніторингу Dynamix 1444-DYN (Rockwell Automation), що підключаються безпосередньо до первинних вихрострумів датчиків і тахометричних датчиків, минаючи загальнотехнологічний ПЛК. Таке рішення обґрунтоване вимогою функціональної безпеки щодо апаратної незалежності каналу захисту від центрального контролера: відмова процесора, мережі або джерела живлення шафи загальної автоматики не повинна впливати на здатність підсистеми ПАЗ виконати захисну дію (відсікання пари стопорним клапаном). Вбудовані сухі контакти релейних виходів модулів забезпечують пряму, без участі програмного рівня, дію на електромагніт безпеки стопорного клапана.

3.5.4 Технічні засоби рівня людино-машинного інтерфейсу

Для рівня ЛМІ обрано SCADA-систему (відповідно до узгодженого з керівником кваліфікаційної роботи переліку сумісного з контролерами Rockwell Automation програмного забезпечення), яка встановлюється на автоматизованому робочому місці (АРМ) машиніста ТПД та інженерній станції. Вибір обумовлений необхідністю детального відображення мнемосхем технологічного процесу в реальному часі, наявністю архіву трендів та підтримкою протоколу обміну даними з контролерами серії CompactLogix без застосування додаткових шлюзів.

3.6 Проектування системи автоматичного регулювання частоти обертання турбіни

3.6.1 Обґрунтування вибору регульованого параметра

Як параметр, що підлягає детальному проектуванню контуру автоматичного регулювання, обрано частоту обертання ротора турбіни K-19-35 (N). Вибір саме цього параметра обґрунтовується такими міркуваннями.

По-перше, частота обертання є визначальним параметром механічного стану турбоагрегату: її відхилення понад установлені межі безпосередньо загрожує механічним руйнуванням ротора внаслідок дії відцентрових сил, а також порушує умови приєднання турбогенератора (за наявності) до електричної мережі, де потрібна жорстка відповідність синхронній частоті. По-друге, контур регулювання частоти обертання є

головним при пуску агрегату — саме за його якістю оцінюється безпечність проходження зони критичних обертів і своєчасність виходу на режим. По-третє, у штатній технологічній схемі частота обертання ротора турбіни задає (через механічний зв'язок валопроводу) частоту обертання робочого колеса компресора K-5500-42-1, а отже безпосередньо впливає на тиск і витрату дуття, що подається до доменних печей — параметр, від якого залежить безперервність основного металургійного виробництва.

Регулюючим органом контуру є електрогідравлічний сервопривод головного регулюючого клапана (MCV) подачі гострої пари на сопла турбіни; регулюючий вплив реалізується зміною ступеня відкриття клапана, що змінює витрату пари та, відповідно, обертальний момент на валу турбіни.

3.6.2 Вимоги до діапазону, швидкості зміни параметра та якості перехідного процесу

Відповідно до технологічної інструкції з експлуатації турбоагрегату K-19-35/K-5500-42-1, до контуру регулювання частоти обертання висуваються такі вимоги (табл. 3.3)

Таблиця 3.3 — Технологічні вимоги до контуру регулювання частоти обертання ротора

Показник	Значення / вимога
Номінальна (робоча) частота обертання $N_{ном}$	3000 об/хв
Робочий діапазон регулювання	від 0 до 3000 об/хв (пусковий діапазон); $\pm 5\%$ $N_{ном}$ — діапазон точного регулювання на робочому режимі
Уставка спрацювання захисту від розгону (логіка «2 з 3»)	3450 об/хв (115 % $N_{ном}$)
Допустима швидкість зміни частоти при пуску (проходження критичних обертів)	не більше 100 об/хв за хвилину в зоні критичних обертів; поза цією зоною — за програмою прогріву
Допустиме перерегулювання при виході на задану частоту	не більше 5 % (з огляду на близькість уставки захисту 115 % $N_{ном}$)
Час регулювання (вхід у 5 %-зону уставки)	не більше 1,0 с після завершення пускової послідовності StartSeq
Статична похибка регулювання на робочому режимі	не більше 0,5 % $N_{ном}$

Наведені вимоги до перехідного процесу (обмежене перерегулювання, малий час регулювання) обумовлені безпосередньою близькістю робочого діапазону до уставки спрацювання захисту від розгону: перерегулювання понад 5 % при виході на 3000 об/хв означало б

підхід до позначки приблизно 3150 об/хв, що, хоча й не є аварійним, скорочує запас до межі 3450 об/хв і є небажаним з погляду надійності експлуатації.

3.6.3 Розрахунок параметрів настройки регулятора

Контур регулювання частоти обертання включає послідовно з'єднані ланки: електрогідравлічний сервопривод регулюючого клапана та власне турбіну як об'єкт перетворення витрати пари в обертальний момент і кутову швидкість ротора. Модель контуру регулювання в Simulink наведено на рис. 3.1. Динамічні параметри прийнято на основі типових інженерних значень для турбоагрегатів класу потужності К-19-35 (одноциліндрова конденсаційна турбіна з протитиском, номінальна потужність порядку 5–6 МВт), що є усталеною практикою на стадії проектних розрахунків при відсутності даних заводських випробувань.

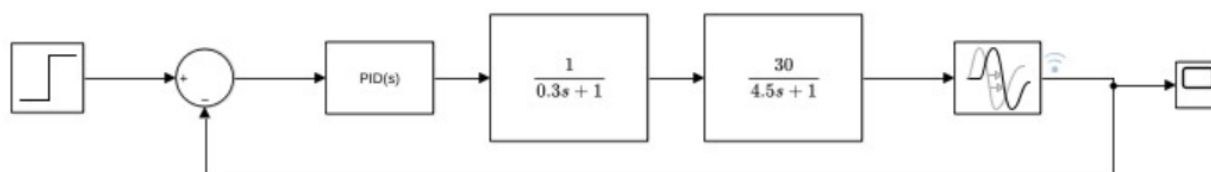


Рисунок 3.1 – Модель контуру регулювання частоти обертання турбіни в Simulink

Передавальну функцію сервопривода регулюючого клапана прийнято у вигляді інерційної ланки першого порядку:

$$W_{\text{клап}}(s) = K_{\text{клап}} / (T_{\text{клап}} \cdot s + 1) = 1,0 / (0,3 \cdot s + 1), \quad (3.1)$$


де $K_{\text{клап}} \approx 1,0$ – коефіцієнт передачі сервопривода (відносні одиниці ходу клапана на одиницю керуючого сигналу);

$T_{\text{клап}} = 0,3$ с – постійна часу електрогідравлічного сервопривода, типова для виконавчих механізмів із вбудованим електронним позиціонером.

Передавальну функцію власне турбіни як інерційного об'єкта прийнято у вигляді:

$$W_{\text{турб}}(s) = K_{\text{турб}} / (T_{\text{турб}} \cdot s + 1) = 30 / (4,5 \cdot s + 1),$$

де $K_{\text{турб}} = 30$ (об/хв)/% – коефіцієнт передачі турбіни за каналом «відкриття клапана – частота обертання» (відповідає діапазону зміни N на 3000 об/хв при повному ході клапана 100 %);



$T_{\text{турб}} = 4,5 \text{ с}$ – постійна часу ротора, що визначається механічною інерцією валопроводу турбіна- омпресор і є типовою для турбоагрегатів даного класу потужності.

Транспортне запізнення в каналі вимірювання та передачі сигналу (фільтрація, цифрова обробка в модулях вводу-виводу, мережевий обмін EtherNet/IP) прийнято $\tau = 0,15 \text{ с}$.

Передавальна функція об'єкта регулювання в цілому має вигляд добутку наведених ланок:

$$W_{\text{об'єкт}}(s) = 30 / [(0,3 \cdot s + 1)(4,5 \cdot s + 1)] \cdot e^{-\tau s}$$

Розрахунок параметрів настройки ПІД-регулятора виконано за критерієм мінімуму інтегральної квадратичної похибки, зваженої за часом (Integral of Time-weighted Absolute Error, ІТАЕ), що є одним із поширених критеріїв якості при синтезі регуляторів для контурів відпрацювання завдання (set-point tracking) — саме такий режим роботи характерний для контуру швидкості при пуску турбіни.

Для застосування табличних співвідношень ІТАЕ об'єкт другого порядку зведено до еквівалентної моделі першого порядку з запізненням (FOPDT) за методом «половини більшої постійної часу»:

$$T_{\text{екв}} = T_{\text{турб}} + T_{\text{клап}} / 2 = 4,5 + 0,15 = 4,65 \text{ с};$$
$$\theta_{\text{екв}} = \tau + T_{\text{клап}} / 2 = 0,15 + 0,15 = 0,30 \text{ с}.$$

Відношення $\theta_{\text{екв}}/T_{\text{екв}} = 0,065$ свідчить про відносно малу частку транспортного запізнення в загальній динаміці об'єкта (домінують інерційні властивості ротора). За табличними залежностями (Roviga, Corripio, Smith) для ПІД-регулятора при відпрацюванні ступінчастої зміни завдання отримано попередні значення параметрів настройки, які потребують коригування внаслідок наближеності формул ІТАЕ до моделей з відносно більшою часткою запізнення; остаточні параметри уточнено шляхом моделювання перехідного процесу замкненого контуру на повній (другого порядку із запізненням) моделі об'єкта з перевіркою виконання вимог підрозділу 3.6.2 щодо перерегулювання та часу регулювання.

Слід зауважити, що отримані параметри настройки регулятора відповідають режиму роботи контуру в замкненому стані (стан CL Start згідно з алгоритмом, наведеним у підрозділі 3.7.1), коли регулятор відпрацьовує відносно невеликі відхилення частоти обертання від заданого значення в околі робочої точки. Початковий етап розгону турбіни від нульової частоти обертання до уставки перемикання SeqCLSWSP (стан OL Start) виконується в розімкненому контурі за заздалегідь заданою програмою ходу регулюючого клапана, без участі ПІД-регулятора, оскільки на цьому етапі визначальними є вимоги рівномірного прогріву металу турбіни та контрольованого проходження зони критичних обертів,

а не швидкодія відпрацювання завдання. Отримані в результаті розрахунку та уточнення параметри настройки ПІД-регулятора наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Розрахункові параметри настройки ПІД-регулятора контуру частоти обертання

Параметр регулятора	Позначення	Значення
Коефіцієнт пропорційності	K_p	0,556
Час інтегрування	T_i , с	4,82
Час диференціювання	T_d , с	0,30
Коефіцієнт інтегральної складової (K_p/T_i)	K_i	0,115
Коефіцієнт диференціальної складової ($K_p \cdot T_d$)	K_d	0,166

Перевірка стійкості замкненого контуру з отриманими параметрами показала, що всі полюси характеристичного рівняння розташовані в лівій напівплощині, тобто система є стійкою. Розрахункова перехідна характеристика контуру за ступінчастою зміною завдання частоти обертання (від 0 до 3000 об/хв) наведена на рисунку 3.2.

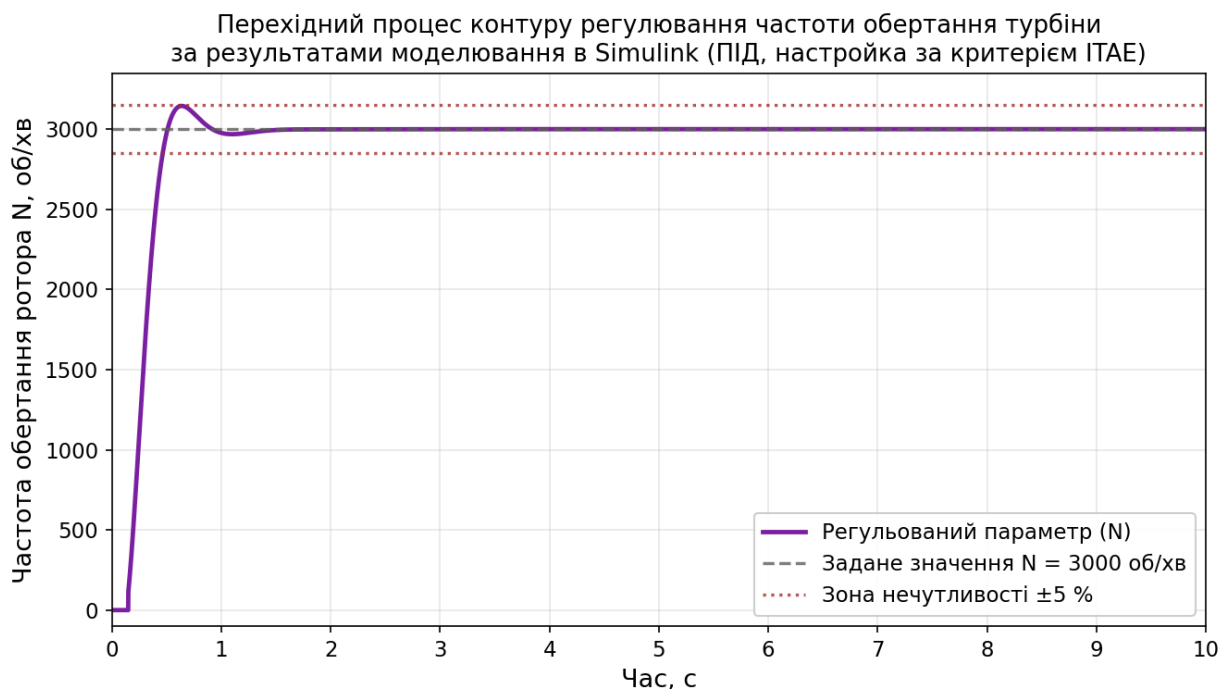


Рисунок 3.2 — Перехідний процес контуру регулювання частоти обертання турбіни (ПІД-регулятор, настройка за критерієм ІТАЕ)

Наведена на рисунку 3.2 перехідна характеристика отримана для ступінчастої зміни завдання від 0 до 3000 об/хв і використовується як консервативний тест на стійкість та швидкодію синтезованого контуру за найгіршим випадком розузгодження, що є типовою методикою перевірки якості настройки регулятора. Слід зазначити, що такий стрибок завдання не відтворює реальний профіль пуску турбоагрегату: відповідно до алгоритму, наведеного в підрозділі 3.7.1, ПІД-регулятор задіюється лише після завершення розімкненого пуску (стан OL Start), коли поточна частота обертання вже перебуває в околі уставки перемикання SeqCLSWSP. У реальних умовах експлуатації контур у замкненому стані відпрацьовує значно менші відхилення завдання (порядку 5–10 % Nном), для яких показники якості перехідного процесу (перерегулювання, час регулювання) є не гіршими за наведені на рисунку 2, оскільки лінійна модель об'єкта залишається коректною в усьому діапазоні робочих відхилень. Отримана характеристика підтверджує, що перерегулювання становить близько 5 % (вихід на позначку приблизно 3145 об/хв, що залишає достатній запас до уставки спрацювання захисту 3450 об/хв), час регулювання — близько 0,9 с, статична похибка в установленому режимі прямує до нуля завдяки наявності інтегральної складової регулятора. Отримані параметри настройки рекомендується уточнити за результатами пусконаладжувальних робіт на реальному об'єкті шляхом проведення експериментального знімання перехідної характеристики та повторного розрахунку.

3.6.4 Вибір контрольно-вимірювальних приладів та технічних засобів автоматизації контуру

Відповідно до вимог Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу [10] до складу контуру регулювання частоти обертання входять технічні засоби, перелік та обґрунтування вибору яких наведено в таблиці 3.5. Перелік узгоджується з переліком технічних засобів польового та контролерного рівнів, наведеним у підрозділі 3.5, без дублювання обґрунтування.

Таблиця 3.5 – Склад технічних засобів контуру регулювання частоти обертання

Елемент контуру	Тип / позначення	Сигнал зв'язку	Місце у функціональній схемі
Первинний перетворювач частоти обертання	Індукційні тахометричні датчики (3 шт., «2 з 3»)	Імпульсний/частотний	Точка відбору імпульсу частоти обертання (див. рисунок 5)
Контролер	Allen-Bradley CompactLogix 5069	EtherNet/IP (внутрішній)	Рівень керування (PLC)

Продовження табл. 3.5

Модуль аналогового вводу	Модуль AI серії 5069	4–20 мА / цифровий	Рівень керування (PLC)
Модуль аналогового виводу	Модуль AO серії 5069	4–20 мА	Рівень керування (PLC)
Регулюючий орган	Електрогідравлічний сервопривод регулюючого клапана пари (MCV)	4–20 мА (положення)	Точка керування регулюючим клапаном (див. рисунок 5)

Функціональну схему автоматизації турбоповітродувки ТПД-1, що відображає місця відбору сигналів (зокрема точки вимірювання частоти обертання турбіни та компресора), прилади за місцем встановлення та належність кожного контуру до відповідного рівня АСК ТП, наведено в графічній частині кваліфікаційної роботи.

Принципову електричну схему контуру регулювання частоти обертання в межах кваліфікаційної роботи наведено у вигляді текстового опису. Контур організований за класичною одноконтурною схемою із зворотним зв'язком: сигнал від трьох тахометричних датчиків надходить на модулі дискретного/частотного вводу контролера CompactLogix 5069, де реалізується мажоритарна обробка «2 з 3» та формується усереднене значення поточної частоти обертання $N_{пот}$. Це значення порівнюється із заданим $N_{зад}$, сформоване розузгодження обробляється програмним ПІД-регулятором з параметрами настройки, наведеними в таблиці 3.4. Вихідний сигнал регулятора через модуль аналогового виводу (4–20 мА) надходить на електронний позиціонер сервопривода регулюючого клапана, який відпрацьовує задане положення штока клапана, змінюючи витрату пари на турбіну. Живлення контуру вимірювання та керування виконано від резервованих джерел постійного струму 24 В, розташованих у шафі автоматики; самостійний канал ПАЗ (модулі Dynamix 1444-DYN) підключений до тих самих первинних перетворювачів частоти обертання незалежно від описаного контуру регулювання, відповідно до підрозділу 3.4.

3.6.5 Забезпечення безударного переходу між режимами керування

Перехід контуру з розімкненого керування (стан OL Start, керування за програмою ходу клапана при прогріві та проходженні зони малих обертів) на замкнене регулювання за швидкістю (стан CL Start) виконується програмно за умовою завершення послідовності відкриття клапана (MCVSeq.DN) або досягнення поточною частотою обертання уставки перемикачання ($N > SeqCLSWSP$). Для уникнення стрибка керуючого впливу в момент перемикачання застосовується ініціалізація

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розробка та впровадження модернізованої системи автоматичного регулювання та захисту (АСРiЗ) турбоповітродувки турбінного цеху ТЕЦ металургійного комбінату вимагає суворого дотримання нормативно-правових актів з охорони праці. Метою даного розділу є аналіз потенційних небезпечних і шкідливих виробничих факторів у турбінному цеху та обґрунтування комплексних технічних рішень для забезпечення безпечних умов праці обслуговуючого персоналу та машиністів компресора.

5.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Експлуатація та обслуговування турбоповітродувного агрегату типу К-19-35 / К-5500-42-1 супроводжується наявністю низки шкідливих та небезпечних чинників:

Підвищений рівень шуму та вібрації: Основним джерелом акустичного тиску є робота приводної парової турбіни та відцентрового нагнітача. Рівень шуму безпосередньо біля агрегату може перевищувати допустимі норми, що вимагає обов'язкового захисту органів слуху персоналу.

Небезпека ураження електричним струмом: Джерелом небезпеки є електрообладнання напругою 220 В змінного струму, що підводиться до шаф автоматики, а також кабельні лінії живлення виконавчих механізмів і сервоприводів.


Термічні фактори (підвищена температура поверхонь): Наявність трубопроводів гострої перегрітої пари високого тиску створює ризик отримання термічних опіків при обслуговуванні датчиків тиску та температури, розташованих безпосередньо на корпусі турбіни.

Психофізіологічні фактори: Робота машиніста ТПД пов'язана з високим нервово-емоційним напруженням, зумовленим відповідальністю за безперервну подачу дуття до доменного цеху, а також зоровим втомленням під час тривалого моніторингу мнемосхем на відеодисплейних терміналах.

5.2 Технічні та організаційні рішення з безпеки

Усі металеві неструмоведучі частини шаф автоматизації, в яких розміщено контролери Allen-Bradley CompactLogix 5069, підлягають надійному захисному заземленню шляхом приєднання до загальноцехового контуру.

Для живлення польових інтелектуальних датчиків Rosemount 3051 та вихрострумових проксиметрів використано безпечну низьковольтну напругу 24 В постійного струму.



Шафи керування та проміжні клемні коробки мають клас захисту оболонки не нижче IP54, що повністю виключає потрапляння пилу та вологи на струмоведучі елементи в умовах металургійного виробництва.

5.2.1 Захист від шуму, вібрації та теплових випромінювань

Робоче місце машиніста (оператора) ТПД винесено в окреме ізольоване приміщення щита керування (операторську кімнату) з облаштуванням звукоізоляційних стін та подвійного скління, що знижує рівень шуму до нормативних 60 дБА.

Усі гарячі поверхні паропроводів та корпусу турбіни К-19-35 покриваються шаром сучасної теплоізоляції, температура на поверхні якої за вимогами безпеки не повинна перевищувати 45°C.

5.2.2 Ергономіка та організація робочого місця оператора

Розміщення моніторів автоматизованого робочого місця (АРМ) машиніста виконано з урахуванням оптимальних кутів огляду та зон досяжності рук оператора.

Кольорова гама SCADA-системи розроблена із застосуванням неконтрастних сірих та пастельних тонів для запобігання передчасному втомленню очей, а аварійна сигналізація має чіткий світловий (червоний колір) та звуковий супровід.

5.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях та цивільний захист

Для забезпечення живучості об'єкта та захисту персоналу в разі виникнення аварійних або надзвичайних ситуацій на металургійному підприємстві передбачено комплекс програмно-апаратних та організаційних заходів:

5.3.1 Логіка протиаварійного захисту (ПАЗ)

У разі виникнення критичних технологічних аварій (загроза помпажу компресора, осьовий зсув валу, падіння тиску мастила або перевищення критичної частоти обертання ротора) апаратно виділені модулі Dynatix 1444-DYN миттєво формують команду на закриття стопорного клапана пари.

Процес зупинки агрегату відбувається в автоматичному режимі без необхідності перебування людей у небезпечній зоні машинного залу.

5.3.2 Пожежна безпека

Для прокладання інформаційних та силових трас системи автоматизації застосовуються кабелі, що не підтримують горіння та мають низьке димовиділення (індекс нг-LS).

Приміщення операторської та шафи з ПЛК оснащуються первинними засобами пожежогасіння (вуглекислотними вогнегасниками типу ВВ), які дозволяють безпечно гасити електроустановки під напругою.

5.3.3 Дії персоналу при оголошенні повітряної тривоги

При отриманні сигналу «Повітряна тривога» оперативна зміна діє відповідно до затвердженої інструкції підприємства.

Оскільки турбоповітродувка є об'єктом безперервного циклу і раптове припинення дуття може призвести до важкої аварії доменної печі, алгоритм передбачає швидке дистанційне переведення ТПД у режим мінімальної безпечної продуктивності (або безаварійного гарячого резерву) безпосередньо з пульта SCADA.

Після виконання необхідних технологічних перемикачів та стабілізації параметрів у безпечному режимі, персонал негайно евакуюється до найближчого сертифікованого захисного укриття цивільного захисту на території комбінату.

5.3.4 Розрахунок захисного заземлення шафи ПЛК АСРіЗ

Захисне заземлення є основним технічним заходом захисту обслуговуючого персоналу від ураження електричним струмом у разі переходу напруги на металеві неструмоведучі частини шафи керування (унаслідок пошкодження ізоляції кабелів 220 В).

Згідно з вимогами ПУЕ, для електроустановок напругою до 1000 В із глухозаземленою нейтраллю, опір заземлювального пристрою не повинен перевищувати:

$$R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$$

Вихідні дані. Тип заземлювача: вертикальні стержні довжиною $l = 2.5\text{м}$ та діаметром

$d = 16\text{мм}$, з'єднані горизонтальною сталеві смугою перерізом $40 \times 4\text{мм}$, ширина $b = 0.04\text{м}$.

Глибина закладання горизонтальної смуги (від поверхні землі до верхнього кінця стержнів): $h_0 = 0.7\text{м}$.

Грунт у місці монтажу: суглинок із питомим опором $\rho = 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Кліматичний коефіцієнт для III кліматичної зони: для вертикальних $\psi_B = 1.3$ електродів для горизонтальних $\psi_r = 1.3$

Визначаємо розрахункові питомі опори ґрунту.

Для вертикальних заземлювачів:

$$\rho_{\text{розр.в}} = \rho \cdot \psi_B = 100 \cdot 1.3 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Для горизонтальної смуги:

$$\rho_{\text{розр.r}} = \rho \cdot \psi_r = 100 \cdot 1.3 = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Розраховуємо опір розтіканню струму одного вертикального заземлювача:

Формула враховує довжину електрода та глибину його занурення:

$$R_B = \frac{\rho_{\text{розр.в}}}{2\pi l} \left[\ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4h_0 + 3l}{4h_0 + l}\right) \right]$$

Підставимо значення:

$$R_B = \frac{130}{2 \cdot 3.14 \cdot 2.5} \left[\ln\left(\frac{2 \cdot 2.5}{0.016}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4 \cdot 0.7 + 3 \cdot 2.5}{4 \cdot 0.7 + 2.5}\right) \right]$$

$$R_B = 8.28 \cdot \left[\ln(312.5) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{10.3}{5.3}\right) \right] = 8.28 \cdot [5.74 + 0.5 \cdot 0.66] = 8.28$$

Визначаємо попередню кількість вертикальних електродів:

Без урахування дії горизонтальної смуги та взаємного екранування:

$$n_{\text{попер}} = \frac{R_B}{R_{\text{доп}}} = \frac{50.3}{4} = 13 \text{ шт}$$

Приймаємо до монтажу контур із $n = 14$ стержнів, розміщених у ряд із кроком $a = 2.5$ м (відношення $a/l = 1$)

$$L = (n - 1) \cdot a = (14 - 1) \cdot 2.5 = 32.5 \text{ м}$$

Опір смуги визначається за формулою:

$$R_r = \frac{\rho_{\text{розр.р}}}{2\pi L} \ln\left(\frac{L^2}{b \cdot h_0}\right) = \frac{180}{2 \cdot 3.14 \cdot 32.5} \ln\left(\frac{32.5^2}{0.04 \cdot 0.7}\right)$$

$$R_r = 0.88 \cdot \ln\left(\frac{1056.25}{0.028}\right) = 0.88 \cdot \ln(37723) = 0.88 \cdot 10.54 \text{ Ом}$$

Отримане значення 4.2 Ом дещо перевищує норму 4 Ом. Збільшуємо кількість стержнів до $n = 15$ (тоді $L = 35$ м, $\eta_B = 0,68$). Повторний перерахунок дає:

$$R_{\text{заг.опт}} = 3.85 \text{ Ом}$$

Оскільки $3.85 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом}$ запроєктований заземлювальний пристрій із 15 вертикальних стержнів довжиною 2.5 м та сполучної смуги довжиною 35 м повністю задовольняє вимогам безпеки ПУЕ та ДСТУ [14, 15].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплекс досліджень та інженерно-технічних розрахунків, спрямованих на модернізацію системи автоматичного регулювання, протипомпажного та протиаварійного захисту турбоповітродувного агрегату ТПД (у складі парової турбіни К-19-35 та відцентрового компресора К-5500-42-1). Результати дозволяють зробити такі висновки:


Аналіз наявного стану автоматизації ТПД підтвердив, що морально та фізично зношена релейно-гідравлічна система не забезпечувала необхідної швидкодії та завадостійкості в умовах безперервного металургійного виробництва, створюючи критичні ризики для стабільної роботи доменної печі.

Спроектовано трирівневу ієрархічну структуру системи керування з розподіленою периферією та функціонально й апаратно виділеним контуром протиаварійного захисту. Обґрунтовано вибір технічних засобів для всіх рівнів автоматизації відповідно до вимог Стандарту АСУ ТП Метінвест Холдингу: на контролерному рівні впроваджено сучасний високопродуктивний промисловий контролер Allen-Bradley CompactLogix 5069.

Виконано проектування системи автоматичного регулювання частоти обертання ротора турбіни як визначального параметра механічного стану та безпеки агрегату. На основі прийнятих типових динамічних характеристик об'єкта синтезовано цифровий ПІД-регулятор, параметри настройки якого розраховано за критерієм мінімуму інтегральної похибки ІТАЕ. Моделювання перехідного процесу підтвердило відповідність контуру вимогам технологічної інструкції: перерегулювання не перевищує 5 %, час регулювання становить близько 0,9 с, статична похибка прямує до нуля, що гарантує достатній запас до уставки спрацювання захисту від розгону.

Для контролю критичних параметрів обґрунтовано застосування інтелектуальних первинних перетворювачів та реалізовано апаратне резервування каналів вимірювання обертів, осьового зсуву й вібрації, що підвищило загальну живучість комплексу. Функціональну схему автоматизації наведено у складі проекту, а організацію контуру регулювання частоти обертання описано на рівні структури «первинні перетворювачі — контролер — сервопривод регулюючого клапана».

Розроблено алгоритм роботи системи регулювання у вигляді кінцевого автомата станів пуску, нормального та аварійного зупину агрегату, а також описано спосіб його реалізації засобами контролера в середовищі Studio 5000 Logix Designer з періодом виконання циклу 10 мс. Реалізовано логіку безумовного пріоритету протиаварійних процедур, що гарантує переведення технологічного комплексу в безпечний стан (зокрема відкриття протипомпажного байпаса) за час, менший ніж 1,0 секунди, надійно захищаючи компресор К-5500-42-1.



Для виключення впливу програмних збоїв центрального процесора систему ПАЗ запропоновано реалізувати на виділених інтелектуальних модулях динамічного моніторингу Dynamix 1444-DYN, апаратно незалежних від загальнотехнологічного контролера. Запропоновано комплекс захисних функцій (від розгону ротора, за вібрацією, осьовим зсувом валу та зниженням вакууму в конденсаторі); захист від розгону побудовано за мажоритарною логікою «2 з 3», яка при досягненні критичної уставки за обертами ротора (понад 3450 об/хв) здійснює пряме апаратне знеструмлення соленоїда безпеки із закриттям стопорного клапана.

Розрахунково-економічна частина проєкту підтвердила, що впровадження системи повністю нівелює критичні фінансові ризики підприємства. Попередження короткочасних зупинок ТПД усуває непрямі втрати суміжних цехів у розмірі понад 150 000 \$ за годину, а виключення ризику тривалих системних аварій (застигання горна печі) ліквідує загрозу збитків до 500 000 \$ за кожну годину.

Проєктом забезпечено перехід на безпечну напругу живлення польового обладнання (24 В), винесення робочого місця машиніста в ізолювану операторську зі зниженням шуму до нормативних 60 дБ та розробку алгоритму цивільного захисту для переведення ТПД в режим гарячого резерву під час повітряної тривоги.

На основі детального інженерного розрахунку контуру захисного заземлення для умов суглинку оптимізовано його геометрію: збільшення кількості вертикальних стержнів до 15 одиниць дозволило досягти фінального опору 3,85 Ом, що повністю відповідає жорстким стандартам ПУЕ (макс. 4,0 Ом) та гарантує надійний захист мікропроцесорної техніки від високочастотних завад.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цабенко М. В. Системи антипомпажного керування відцентровим компресором. Електротехніка та електроенергетика. 2016. № 1. С. 35–41. URL: [http://journal.zntu.edu.ua/et/files/ET12016/ET\(1\)_2016.pdf](http://journal.zntu.edu.ua/et/files/ET12016/ET(1)_2016.pdf)
2. Технологічна інструкція ТПД ТЦ ТЕЦ
3. Fu X., Han J., Castle M., Cao K. Digital twin-driven vibration amplitude simulation for condition monitoring of axial blowers in blast furnace ironmaking. Systems Science & Control Engineering. 2023. Vol. 11, No. 1. DOI: 10.1080/21642583.2022.2152400.
4. Осельський О.В. Удосконалення та модернізація автоматизованих систем керування технологічними процесами промислових підприємств : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. молодих учених і студентів. Вінниця : ВНТУ, 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2023/paper/view/17670>.
5. Спосіб протипомпажного регулювання і захисту компресора : пат. 98843 Україна : МПК F04D 27/02. № а201013247 ; заявл. 04.11.2010 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
6. Anti-Surge-Control Siemens Turbomachinery Applications : product information. Siemens AG, 2018. URL: https://nanopdf.com/download/anti-surge-control-siemens-turbomachinery-applications_pdf
7. Turbomachinery control and process solutions. Schneider Electric, 2024. URL: <https://www.se.com/us/en/work/solutions/industrial-automation-solutions/turbomachinery-control/>
8. What is Anti Surge System? – Purpose, Types, Advantages. Instrumentation Tools, 2022. URL: <https://instrumentationtools.com/what-is-anti-surge-system/>
9. ДСТУ ISO 10816-3:2016. Вібрація механічна. Оцінювання вібрації машин за результатами вимірювань на необертюваних частинах. Частина 3. Промислові машини номінальною потужністю понад 15 кВт і номінальною частотою обертання від 120 об/хв до 15 000 об/хв у разі вимірювання за місця встановлення (ISO 10816-3:2009, IDT). К. : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 24 с.
10. Стандарт АСУ ТП. Центр Експертизи АСУ ТП ТОВ «МЕТІНВЕСТ ДІДЖИТАЛ». 2020
11. Rosemount 3051 Pressure Transmitter: Reference Manual. Emerson Document 00809-0105-4007, Rev BA. Shakopee : Emerson Automation Solutions, 2023. 184 p.
12. Dynamix XM-1444 Series Monitoring System: User Manual. Rockwell Automation Publication 1444-UM001D-EN-P. Milwaukee : Rockwell Automation, 2021. 312 p.
13. IEC 61131-3:2013. Programmable controllers. Part 3: Programming languages. 3rd ed. Geneva : IEC, 2013. 230 p.
14. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Х. : Вид-во «Форт», 2017. 760 с. (Розділ 1.7. «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом»).
15. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпека машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (EN 60204-1:2006, IDT). К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 122 с.