

Тема : "Розробка системи автоматичного вводу резерву для живлення електромеханічної системи оберткової печі металургійного підприємства"

Носик Данило Олександрович

Керівник Титюк Валерій Костянтинович

## ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

### Розділ 1. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ОБЕРТОВОЇ ПЕЧІ ВИПАЛЮВАННЯ ВАПНА

#### 1.1 Загальні відомості процесу випалу вапна

##### 1.1.1 Основні види вапна та його властивості

Вапно – це термін, що позначає обпалене негашене та гідратне (гашене водою) вапно. Негашене вапно отримують з кальцієвомагнієвих гірських порід в пічних агрегатах шляхом випалу до видалення вуглекислоти (CO<sub>2</sub>) [1].

В чорній металургії вапно поділяють на [1]:

- звичайне для сталеплавильного виробництва (ВС);
- доломітизоване для сталеплавильного виробництва (ВСД);
- для феросплавного виробництва (ВФ).

Залежно від способу виробництва вапно кожної марки ділять на категорії: 0, 1, 2 та позначають ВС - 0, ВС - 1, ВС - 2; ВСД - 1; ВФ - 0, ВФ - 1, ВФ - 2 [1]. Способи виробництва та область застосування вапна у металургійній промисловості показана в табл. 1.1 [1].

Негашене грудкове або порошкоподібне вапно, яке застосовується як флюс добавки і складовою шихти в процесах виплавки сталі та феросплавів, випускається двох сортів: першого і другого і повинне відповідати певним хімічним складовим.

Таблиця 1.1 – Способи виробництва та область застосування вапна [1]

Марка	Область використання	Спосіб виробництва
ВС-1	Конверторне і електросталеплавильне виробництво, виплавка синтетичних шлаків, приготування рафінуючих сумішей	Оберткові печі, печі киплячого шару
ВС-2	Мартенівське (в т.ч. двохванні печі) і електросталеплавильне виробництво, виплавка синтетичних шлаків, приготування рафінуючих сумішей	Шахтні печі
ВСД-1	Конверторне виробництво, виплавка синтетичних шлаків, приготування рафінуючих сумішей	Оберткові печі, печі киплячого шару
ВФ-0	Виробництво особливих видів феросплавів (в т.ч. алюмінотермічним способом) і низьковуглецевого ферохрому	Оберткові печі, шахтні печі
ВФ-1	Виробництво високоякісних феросплавів	Оберткові печі
ВФ-2	Виробництво рядових феросплавів	Шахтні печі

Вапно, що використовується в агломерації для інтенсифікації спікання тонких залізородних концентратів, повинне містити не менше 80 % CaO + MgO.

##### 1.1.2 Технологічне паливо

Природні та штучні види палива застосовують для виробництва вапна. До природних відносяться:

- тверде (антрацит, кам'яне вугілля);
- газоподібне (природний газ).

До штучних відносяться:

- штучне тверде (кокс);
- газоподібне (змішаний, попутний, коксовий, доменний, генераторний газ);
- рідке (мазут, суспензії).

1) Кокс металургійний (найдорожчий вид палива) має найкращі характеристики: висока тепловіддача (26...30 МДж/кг), вміст летючих речовин (1,1...8 %), золи (9...10 %), вологи (2...5 %) [1, 2].

2) Антрацит після коксу – найбільш якісне тверде паливо. Має характеристики: вуглецю (93...94 %), золи (4...14 %), вологи (3...6%) та летючих речовин (водню 1,8 %), тепловіддача (26...31,2 МДж/кг) (антрацит горить коротким полум'ям і не спікається).

3) Кам'яне вугілля не використовуються для отримання високоякісного вапна через підвищений вміст летючих речовин та золи. Застосовується в шахтних пересипних печах, виробляється будівельне вапно низької якості (процес супроводжується перевитратою палива).

4) Мазут. Має характеристики: вуглецю (86...87 %), водень (11,7...12,8 %), золи (0,1...0,3 %), вологи (1,4 %), тепловіддача (40,4...42,4 МДж/кг).

5) Газоподібне паливо – це природні і штучні гази та їх суміші. Природні гази мають характеристики: метан  $\text{CH}_4$  (43...98 %), важкі вуглеводи, температура самозаймання в повітрі (атмосферний тиск) 530...650 °С, тепловіддача (32,8...46 МДж/м<sup>3</sup>), спалахують при змішуванні з повітрям в межах 4,5...13,5 %.

При розрахунку горіння палива визначають потрібну кількість повітря, кількість і склад продуктів горіння.

Криворізький гірничо-металургійний комбінат «ArcelorMittal Кривий Ріг» при виробництві вапна проводить поступове заміщення використання природного газу біопаливом – сировини для виплавки чавуну і сталі, випуску агломерату. Про це, з посиланням на корпоративне видання «Металург», повідомляє «Інтерфакс-Україна».

Як зазначається, вогнетривкий вапняний цех (ВВЦ) поряд з аглоцехами, ТЕЦ, доменними і прокатними цехами завжди входив до числа найбільших споживачів природного газу.

З урахуванням зростання вартості даного виду енергоносія, ціна на який в даний час для підприємства становить більше 7000 грн за 1 тис. м<sup>3</sup> і подальшою тенденцією до підвищення, питання підвищення енергоефективності актуалізувалися.

На обертових печах №№ 4-5 паралельно газовому пальнику були встановлені й пальники для біопалива – лущиння насіння соняшнику. Фахівці відпрацьовували режими подачі палива в печі – аналогів такого заміщення при виробництві вапна в Україні немає.

Відзначається, що спільна робота фахівців ВВЦ і представників підрядної організації, яка надала свою технологію й устаткування, дала хороші результати – печі споживають більше 70 % біопалива і менше 30 % природного газу, а в короткострокові періоди заміна становила до 84 %. При цьому 2,2 тони подрібненого лущиння замінюють 1 тис. м<sup>3</sup> природного газу, а вартість втричі менше.

### 1.1.3 Випал карбонатних порід на вапно

При нагріванні вапняків при температурі 200...800°C відбувається збільшення обсягу на 2...4 % та зниження міцності на 40...70 %; при нагріванні крейди відбувається підвищенням межі міцності.

При подальшому нагріванні відбуваються:

- термічна дисоціація карбонатів кальцію і магнію;
- рекристалізація і спікання утворених оксидів кальцію і магнію;
- утворення силікатів і алюмоферитів кальцію.

Температура дисоціації  $\text{CaCO}_3$  – 898 °С,  $\text{MgCO}_3$  – 710 °С.

Швидкість дисоціації карбонатів залежить від:

- від температури випалу;
- коефіцієнта тепловіддачі від газів до матеріалу;
- теплопровідності матеріалу;
- мікроструктури матеріалу.

Величина ступеня дисоціації карбонатів ( $\eta_{c.o.}$ ) в обертових печах дорівнює 98...99 % та залежить від вмісту активних оксидів у вапні та залишкової вуглекислоти у вапні.

Режими отримання якісного вапна в обертових печах:

1) При випалюванні чистих кальцієвих карбонатних порід (використання малозольного палива) рекомендована температура – 1200...1300 °С.

2) При випалюванні чистих кальцієвих карбонатних порід (використання твердого палива зольністю вище 12...15 %) рекомендована температура – не вище 1100...1150 °С.

3) При випалюванні вапняку (крейди) із вмістом глинистих домішок більше 4 % (використання малозольного палива) рекомендована температура – не вище 1250 °С.

## 1.2 Обертові печі для випалу карбонатної сировини на вапно

В світі близько 40 % загального обсягу виробництва вапна приходить на обертові печі, в Україні цей показник складає 30 %.

Переваги обертових печей:

- висока ступінь дисоціації сировини (98...99 %);
- отримання рівномірно обпаленого вапна (з заданими часом та температурою гасіння);
- ефективне спалювання палива ( $\eta_{c.d.} = 98...99\%$ );
- велика потужність печі (140...1000 т вапна на добу);
- випал сировини різної вологості;
- отримання певних матеріалів тільки при випалюванні в обертовій печі.

Недоліки обертових печей:

- значні капітальні вкладення при будівництві;
- значна металосмність;
- підвищена питома витрата палива;
- значний винос пилу та газів.

Трубні обертові печі поділяють на довгі з внутрішньопічними теплообмінними пристроями та короткі з запічними підігрівниками сировини.

Печі першого типу мають просту конструкцію, високу надійність, дозволяють обпалювати будь-яку карбонатну сировину (не має значення хімічний склад, фізичні властивості та вологість).

Печі другого типу мають більш складне і трудомістке обслуговування; працюють із сировиною у вигляді фракцій (міцність – не менше 20 МПа, вологість – не вище 8 %).

В табл. 1.2 наведено основні показники обертових печей для виробництва вапна.

Таблиця 1.2 – Основні показники обертових печей

Тип печі	Питома витрата умовного палива, кг	Питома витрата електроенергії, кВт*год.	Довжина, м
Довга з внутрішньо-пічними теплообмінниками	240...300	17...20	100
Коротка з запічними підігрівниками	165	25...40	38,6

Довга обертова піч показана на рис. 1.1.

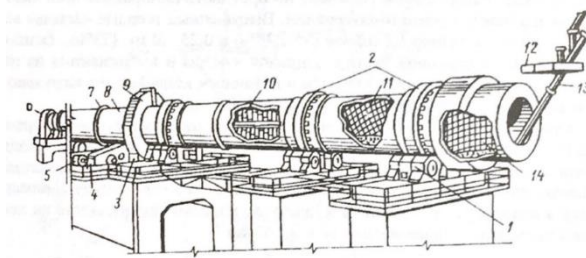


Рисунок 1.1 – Довга обертова піч із внутрішньопічними теплообмінними пристроями: 1 – роликова опора, 2 – бандажі, 3 – підвінцева шестерня, 4 – редуктор приводу, 5 – електродвигун головного приводу печі, 6, 12 – завантажувальна і розвантажувальна головки печі, 7 – кільце жорсткості, 8 – корпус, 9 – вінцева шестерня, 10, 11, 14 – внутрішньопічні теплообмінники, 13 – завантажувальна труба-тічка сировини

Обертова піч для виробництва вапна представляє собою:

- теплоізований циліндричний сталевий корпус 8;
- внутрішньопічні теплообмінники 10, 11, 14;
- бандаж 2, яким корпус спирається на роликові опори;
- роликові опори 1, на які встановлено корпус (роликові опори встановлено на фундаментні опори);
- завантажувальну головку 12;
- завантажувальну тічку 13, якою оснащено завантажувальну головку;
- розвантажувальну головку 6, яка забезпечена пальниковим пристроєм;
- електропривода 4, 5.

Корпус печі представляє собою порожнистий сталевий барабан 8, зварений із секцій, діаметром від 2,5 м до 4 м та товщиною до 30 мм.

Секції корпусу виготовляються з різних марок прокатної сталі: сталь марки ВСт3Сп5 використовується для секцій товщиною до 25 мм; сталь марки М16С використовується для секцій товщиною більше 25 мм.

В 2–3 рази збільшують товщину корпусу під бандажами та приводною шестерню для підвищення жорсткості останнього.

Для проведення ремонтних робіт корпус печі обладнаний люками. Для установки контрольно-вимірювальних приладів та для відбору проб матеріалу в корпусі передбачено отвори з кришками.

Зі сталі марок 30ГСЛ, 35ХГСЛ, 35ХМЛ, 30ГС, 35ХГС, 35ХМ виготовляють бандажі, які представляють собою кільця прямокутного перерізу, та посажені на корпусі печі.

Для обмеження осьового зсуву обертові печі використано опорні та упорні пристрої.

Корпус обертової печі встановлено під кутом від 3 до 4 % по відношенню до горизонту.

Корпус обертової печі обертається з частотою 0,5...1,5 об/хв.

Головний привод обертової печі складається з:

- двигуна 5;
- електромагнітного гальма;
- редуктора 4;
- підвінцевої шестерні 3;
- вінцевої шестерні 9.

Через редуктор, підвінцеву та вінцеву шестерні з корпусом з'єднано двигун головного привода.

Чим більше діаметр корпусу (до 4 м), тим більше радіальне зусилля, яке передається підвінцевою шестернею. Тому печі (діаметр 4 м, довжина 170 м) мають двосторонній привод (з однією вінцевою і двома підвінцевими шестернями).

Електромагнітне гальма дозволяє зупинити піч в будь-якому положенні. При аваріях, ремонтних роботах та в період пуску використовується допоміжний електропривод невеликої потужності, який обертає корпус печі з частотою 4 об/год.

Для покращення теплообміну між матеріалом та газовим потоком в завантажувальній частині використовують теплообмінники 10, 11, 14.

Види теплообмінників: ланцюгові (відбувається конвективно-регенеративний теплообмін газів та матеріалу); металічні екрано-лопатні; металічні циклоїдні; металічні з комірками.

### **1.3 Особливості спалювання природного газу в обертових печах**

Корпус печі представляє собою порожнистий сталевий барабан 8, зварений із секцій, діаметром від 2,5 м до 4 м та товщиною до 30 мм.

Секції корпусу виготовляються з різних марок прокатної сталі: сталь марки ВСт3Сп5 використовується для секцій товщиною до 25 мм; сталь марки М16С використовується для секцій товщиною більше 25 мм.

В 2–3 рази збільшують товщину корпусу під бандажами та приводною шестерню для підвищення жорсткості останнього.

Для проведення ремонтних робіт корпус печі обладнаний люками. Для установки контрольно-вимірювальних приладів та для відбору проб матеріалу в корпусі передбачено отвори з кришками.

Зі сталі марок 30ГСЛ, 35ХГСЛ, 35ХМЛ, 30ГС, 35ХГС, 35ХМ виготовляють бандажі, які представляють собою кільця прямокутного перерізу, та посажені на корпусі печі.

Для обмеження осьового зсуву обертові печі використано опорні та упорні пристрої.

Корпус обертової печі встановлено під кутом від 3 до 4 % по відношенню до горизонту.

Корпус обертової печі обертається з частотою 0,5...1,5 об/хв.

Головний привод обертової печі складається з:

- двигуна 5;
- електромагнітного гальма;
- редуктора 4;
- підвінцевої шестерні 3;
- вінцевої шестерні 9.

Корпус печі представляє собою порожнистий сталевий барабан 8, зварений із секцій, діаметром від 2,5 м до 4 м та товщиною до 30 мм.

Секції корпусу виготовляються з різних марок прокатної сталі: сталь марки ВСт3Сп5 використовується для секцій товщиною до 25 мм; сталь марки М16С використовується для секцій товщиною більше 25 мм.

В 2–3 рази збільшують товщину корпусу під бандажами та приводною шестерню для підвищення жорсткості останнього.

Для проведення ремонтних робіт корпус печі обладнаний люками. Для установки контрольно-вимірювальних приладів та для відбору проб матеріалу в корпусі передбачено отвори з кришками.

Зі сталі марок 30ГСЛ, 35ХГСЛ, 35ХМЛ, 30ГС, 35ХГС, 35ХМ виготовляють бандажі, які представляють собою кільця прямокутного перерізу, та посажені на корпусі печі.

Для обмеження осьового зсуву обертової печі використано опорні та упорні пристрої.

Корпус обертової печі встановлено під кутом від 3 до 4 % по відношенню до горизонту.

Корпус обертової печі обертається з частотою 0,5...1,5 об/хв.

Головний привод обертової печі складається з:

- двигуна 5;
- електромагнітного гальма;
- редуктора 4;
- підвінцевої шестерні 3;
- вінцевої шестерні 9.

Вимоги щодо коефіцієнту надлишку повітря  $\alpha$  :

- повинен бути мінімальним;
- забезпечувати спалювання палива без хімічного недопалу;
- оптимальний в діапазоні  $\alpha = 1,05...1,08$  (при  $\alpha = 1,03$  починається хімічний недопал палива).

На підприємствах планують перехід обертових печей на біопаливо і подальше збільшення його частки при виробництві вапна.

#### 1.4 Тягодуттєві машини обертових печей

В обертових печах встановлюються центробіжні вентилятори високого тиску типів ВВД або Ц8-18; типів ВДН, ВГДН та консольні димососи типу ДН-9; 10; 11,2; 12,5; 15; 19; дуттєві вентилятори типорозмірів ВДН-8; 9; 10; 11,2; 12,5; 15; 17; вентилятори гарячого дуття ВГДН-11,2; 12,5; 15; 17; 19; 21; центробіжні пилові вентилятори ЦП7-40; димососи двостороннього всмоктування ДН-22Х2-0,62 та ДН-24Х2-0,62.

Вентилятори типу ВВД мають вузький кожух і відносно невеликі розміри вхідних і вихідних отворів; 12 вузьких та довгих лопаток, що загнуті вперед та закріплені переднім диском.

За технічною документацією вогнетривкого вапняного цеху (ВВЦ) Криворізького гірничо-металургійного комбінату ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» на обертовій печі по випалу вапна встановлено вентилятор ВВД-6,3 (ВР170-18-6,3). Вентилятор ВВД-6,3 (ВР170-18-6,3) виготовлений на Вентиляторному заводі «Укрвентсистеми» м. Харкова.

Загальний вид вентилятора показаний на рис. 1.2.

Технічні характеристики вентилятора ВВД-6,3 (ВР170-18-6,3) наведені в табл. 1.3.

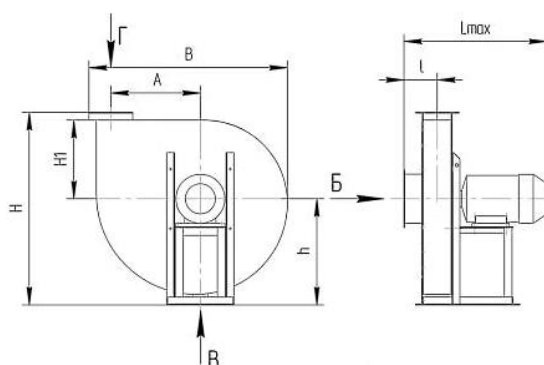


Рисунок 1.2 – Габаритні розміри вентилятора ВВД-6,3

Таблиця 1.3 – Технічна характеристика вентилятора ВВД-6,3 [12]

Технічні характеристики	Одиниці вимірювання	Величина характеристики
Діаметр робочого колеса	мм	630
Швидкість обертання колеса	об/хв.	3000
Продуктивність	м <sup>3</sup> /год.	6750

Повний тиск	Па	9240
	кгс/м <sup>2</sup>	942,218
Максимальний ККД	в.о.	0,8
Споживана потужність	кВт	30
Обороти двигуна	об/хв.	3000
Напруга	В	380

Вентилятор ВВД-6,3 (ВР170-18-6,3) має аеродинамічні характеристики, які показані на рис. 1.3 [12].

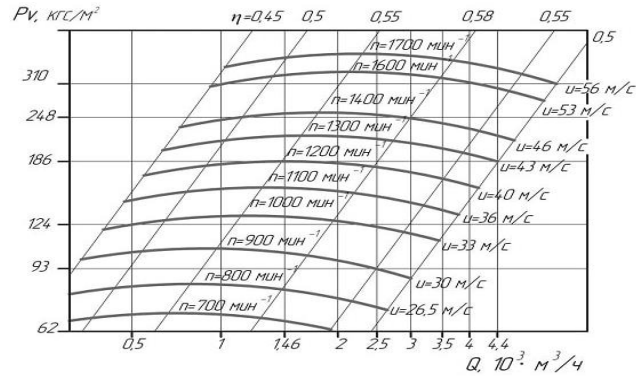


Рисунок 1.3 – Аеродинамічні характеристики вентилятора ВВД-6,3

### 1.5 Вибір приводного двигуна вентилятора ВВД-6,3

Розрахункова потужність вентилятора обчислюється за виразом:

$$P_{\text{вент}} = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot \eta \cdot \eta_n} = \frac{1,875 \cdot 942,218}{102 \cdot 0,8 \cdot 1,0} = 21,65 \text{ кВт}, \quad (1.1)$$

де  $Q$  – продуктивність вентилятора, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – тиск газу, кгс/м<sup>2</sup>;

$\eta$  – ККД вентилятора;

$\eta_n$  – ККД передачі між двигуном й механізмом.

Потужність двигуна вибирається з урахуванням коефіцієнтів за виразом:

$$P_{\text{дв}} = k_3 \cdot k_n \cdot P_{\text{вент}} = 1,2 \cdot 1,1 \cdot 21,65 = 28,578 \text{ кВт} \quad (1.2)$$

де  $k_3 = 1,2$  – коефіцієнт запасу, що враховує неточність розрахунку потужності вентилятора;

$k_n = 1,1$  – коефіцієнт, що уточнює потужність електродвигуна в регульованих системах електропривода.

За розрахованою потужністю з каталогу вибрано асинхронний двигун серії АІР180М2У3.

Паспортні дані двигуна наведені у табл. 1.4 [6, 7].

Таблиця 1.4 - Паспортні дані двигуна типу АІР180М2У3

Технічні характеристики	Одиниці вимірювання	Величина характеристики
Номинальна потужність: $P_n$	кВт	30
Частота обертання поля статора: $n_0$	об/хв.	3000
Частота обертання ротора: $n_n$	об/хв.	2950
Номинальна напруга: $U_n$	В	380
Номинальний струм: $I_n$	А	55,4
ККД: $\eta_n$	%	91,4
Коефіцієнт потужності: $\cos \varphi_n$	–	0,81
Перевантажувальна здатність: $\gamma = \frac{M_{\max}}{M_n}$	–	2,3
Співвідношення моментів: $\beta = \frac{M_{II}}{M_n}$	–	2,0
Співвідношення струмів: $\alpha = \frac{I_n}{I_n}$	–	7,5
Момент інерції: $J$	кгм <sup>2</sup>	0,07

### Висновки до першого розділу

У першому розділі розглянуто технологію випалу вапна, наведено відомості про технологічний процес і типове технологічне обладнання, що використовується в процесі випалу вапна.

Розглянуто особливості роботи обертових печей з випалювання вапна, розглянуто особливості спалювання природного газу в обертових печах.

Наведено технічні характеристики тягодуттєвих машин обертових печей випалювання вапна, наведено основні технічні характеристики та напірні характеристики тягодуттєвого вентилятора ВВД-6,3.

Виконано розрахунок потужності тягодуттєвого вентилятора ВВД-6,3, у якості електроприводу використано асинхронний трифазний електродвигун з короткозамкненим ротором типу АИР180М2У3 номінальною потужністю 30 кВт з частотою обертання 3000 об/хв.

## Розділ 2 РОЗРАХУНКИ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВСТАНОВЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ВМИКАННЯ РЕЗЕРВУ

### 2.1 Опис проблем, що виникають в печі при зникненні напруги

При зникненні напруги живлення в обертових печах виникають наступні негативні процеси:

- вапно збивається в купу;
- піч неможливо зрушити з місця;
- необхідно продувати газопровід;
- злежується гаряче лушпиння в шнеках;
- необхідно починати процес запуску заново;
- осідає зола (від спалювання лушпиння) тощо.

У кваліфікаційній магістерській роботі запропоновано вирішити наступні питання.

Запропоновано встановити систему АВР (автоматичне вмикання резерву), яка в разі виникнення ситуації втрати напруги живлення, переключить обладнання на живлення від резервного джерела або від дизель генератора.

Комплекс заміщення природного газу обертової печі складається з приймального бункера, шнекового конвеєра, бункера дозування, нагнітаючого вентилятора і розпилювача. Управління електричними механізмами комплексу заміщення природного газу складається з шафи управління, пульта управління, пульта управління шнековим конвеєром, пульта дистанційного керування. Завантаження бункера матеріалом здійснюється з приймального бункера і похилого шнекового конвеєра печі №5, що надходить на шнековий конвеєр і далі в бункер, управління яким здійснюється з пульта управління шнековим конвеєром.

Бункер дозування включає в себе два незалежних шнекових живильників і шлюзових дозаторів. Управління вентилятором і шнековими дозаторами здійснюється з силової шафи управління. Апаратура управління шлюзовими живильниками, засувкою вентилятора і кнопки управління механізмами розташована в пульті управління. Пульт дистанційного керування встановлено на посту управління піччю і призначений для дистанційного керування.

Потужності приводних двигунів зведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри приводних двигунів печі

Назва	Призначення	Потужність, кВт	Швидкість, об/хв
М1	Вентилятор	30,0	2940
М2, М3	Шнекові живильники №1, 2	2,2	1450
М4	Засувка	0,37	915
М5, М6	Шлюзові живильники №1, №2	2,2	1400
М7	Електрофільтр	5,0	1430

## 2.2 Розрахунок параметрів обладнання для встановлення системи АВР

### 2.2.1 Розрахунок параметрів двигуна вентилятора АИР180М2У3

Синхронна частота (частота обертання магнітного поля статора) двигуна:

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 3000}{30} = 314,2 \text{ рад/с.} \quad (2.1)$$

Номінальна частота обертання ротора:

$$\omega_H = \frac{\pi \cdot n_H}{30} = \frac{\pi \cdot 2950}{30} = 308,9 \text{ рад/с.} \quad (2.2)$$

Номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = \frac{314,2 - 308,9}{314,2} = 0,01687. \quad (2.3)$$

Критичне ковзання:

$$S_K = S_H \cdot (\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1}) = 0,01687 \cdot (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}) = 0,07374, \quad (2.4)$$

де  $\lambda_M = 2,3$  – величина перевантаження двигуна.

Пусковий коефіцієнт потужності:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{II} &= \cos \varphi_H \cdot \left[ \lambda_{II} \cdot \frac{\eta_H}{(1 - S_H) \cdot k_i} + 0,33 \cdot [(1 - \eta_H) \cdot k_i] \right] = \\ &= 0,81 \cdot \left[ 2,0 \cdot \frac{0,914}{(1 - 0,01687) \cdot 7,5} + 0,33 \cdot [(1 - 0,914) \cdot 7,5] \right] = 0,373 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Номінальний струм двигуна:

$$I_H = \frac{P_{IH}}{\sqrt{3} U_{IH} \cdot \eta_H \cdot \cos \varphi_H} = \frac{30000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,914 \cdot 0,81} = 61,57 \text{ А.} \quad (2.6)$$

Номінальний момент:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30000}{308,9} = 97,12 \text{ Нм.} \quad (2.7)$$

Момент інерції:

$$J_D = 0,00015 \cdot M_H^{1,5} = 0,00015 \cdot 97,12^{1,5} = 0,144 \text{ Нм.} \quad (2.8)$$

Пусковий момент:

$$M_{II} = \lambda_{II} \cdot M_H = 2,0 \cdot 97,12 = 194,2 \text{ Нм.} \quad (2.9)$$



Критичний момент:

$$M_K = \lambda_M \cdot M_H = 2,3 \cdot 97,12 = 223,4 \text{ Нм.} \quad (2.10)$$

Повний опір двигуна при загальмованому роторі:

$$Z_{K3} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3} \cdot I_H \cdot k_i} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 61,57 \cdot 7,5} = 0,4751 \text{ Ом.} \quad (2.11)$$

Приведений активний опір ротора:

$$r_2' = \frac{M_{\Pi} \cdot Z_{K3}^2}{m_C \cdot U_{1H}^2} = \frac{194,2 \cdot 0,4751^2}{3 \cdot 380^2} = 0,09538 \text{ Ом.} \quad (2.12)$$

$$\frac{3 \cdot \omega_0}{3 \cdot 314,2}$$

Активний опір фазної обмотки статора:

$$r_1 = Z_{K3} \cdot \cos \varphi_{\Pi} - r_2' = 0,4751 \cdot 0,3732 - 0,09538 = 0,08193 \text{ Ом} \quad (2.13)$$

Індуктивний опір АД при загальмованому роторі (повний індуктивний опір):

$$X_{K3} = Z_{K3} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} = 0,4751 \cdot \sqrt{1 - 0,81^2} = 0,2786 \text{ Ом.} \quad (2.14)$$

Повний активний опір:

$$R_{K3} = \sqrt{Z_{K3}^2 - X_{K3}^2} = \sqrt{0,4751^2 - 0,2786^2} = 0,3848 \text{ Ом} \quad (2.15)$$

Приведений індуктивний опір ротора двигуна:

$$X_2' = \frac{X_{K3}}{\left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right)} = \frac{0,2786}{\left(1 + \frac{0,08193}{0,09538}\right)} = 0,1499 \text{ Ом} \quad (2.16)$$

Індуктивний опір обмотки статора:

$$X_1 = X_{K3} - X_2' = 0,2786 - 0,1499 = 0,1287 \text{ Ом.} \quad (2.17)$$

Струм холостого ходу статора:

$$I_{XX} = I_H \cdot \left( \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \cos \varphi_H \cdot \frac{X_2'}{r_1 + \frac{r_2'}{S_H}} \right) = \quad (2.18)$$

$$= 61,57 \cdot \left( \sqrt{1 - 0,81^2} - 0,81 \cdot \frac{0,1499}{0,08193 + \frac{0,09538}{0,01687}} \right) = 34,8 \text{ А.}$$

Індуктивність статора і ротора:

$$L_1 = \frac{\frac{U_{1H}}{\sqrt{3}}}{2 \cdot p \cdot f_H \cdot I_H \cdot \left( \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - \frac{\cos \varphi_H \cdot S_H}{S_K} \right)} = \frac{380,0}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,0 \cdot 50 \cdot 61,57 \cdot \left( \sqrt{1 - 0,81^2} - \frac{0,81 \cdot 0,01687}{0,07374} \right)} = 0,08883 \text{ Гн.} \quad (2.19)$$

Електрорушійні сили (ЕРС) двигуна WEG W22:

$$e_{11} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_H - r_1 \cdot I_H = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,81 - 0,08193 \cdot 61,57 = 172,7 \text{ В.} \quad (2.20)$$

$$e_{12} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi_H - X_1 \cdot I_H = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 0,81 - 0,1287 \cdot 61,57 = 169,8 \text{ В.} \quad (2.21)$$

Опір кола намагнічування:

$$X_m = \frac{\sqrt{e_{11}^2 + e_{12}^2}}{I_{XX}} = \frac{\sqrt{172,7^2 + 169,8^2}}{34,8} = 6,96 \text{ Ом} \quad (2.22)$$

$$L_m = \frac{X_m}{2\pi \cdot 50} = \frac{6,96}{2\pi \cdot 50} = 0,02215 \text{ Гн.} \quad (2.23)$$

Індуктивність розсіювання:

$$L_{\sigma S} = \frac{X_1}{2\pi \cdot 50} = \frac{0,1287}{2\pi \cdot 50} = 0,0004097 \text{ Гн.} \quad (2.24)$$

$$L_{\sigma r} = \frac{X_2}{2\pi \cdot 50} = \frac{0,1499}{2\pi \cdot 50} = 0,0004771 \text{ Гн.} \quad (2.25)$$

Конструкційний коефіцієнт:

$$C_1 = \frac{I_{XX}}{2 \cdot I_H \cdot k_i} + 1 = \frac{34,8}{2 \cdot 61,57 \cdot 7,5} + 1 = 1,038. \quad (2.26)$$

Індуктивність статора і ротора:

$$L_s = L_{\sigma S} + L_m = 0,0004097 + 0,02215 = 0,02256 \text{ Гн.} \quad (2.27)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_m = 0,0004771 + 0,02215 = 0,02263 \text{ Гн.} \quad (2.28)$$

Сумарні втрати двигуна:

$$\Sigma \Delta P_H = \frac{P_H(1 - \eta_H)}{\eta_H} = 4180 \text{ Вт}$$

Номінальні змінні втрати двигуна із розрахунку 70% від повних складуть

$$\Delta P_{var} = \frac{\Sigma \Delta P_H}{(1 + 0,7 \cdot 0,7)} = 2806 \text{ Вт}$$

Умовно сталі втрати потужності двигуна

$$\Delta P_{const} = \Sigma \Delta P_H - \Delta P_{var} = 1374 \text{ Вт}$$

### 2.2.2 Розрахунок параметрів силового трансформатора

Для вибору трансформатора визначають лінійну напругу вентильної (вторинної) обмотки трансформатора:

$$U_{2л} = \sqrt{3} \cdot \frac{K_r}{K_u \cdot K_c} \cdot U_{ннн} = \sqrt{3} \cdot \frac{1,05}{2,34 \cdot 0,85} \cdot 400 = 365,7 \text{ В}, \quad (2.29)$$

де  $K_r = 1,05$  – коефіцієнт, що враховує падіння напруги за рахунок комутації тиристорів, на активних опорах трансформатора, вентилів, згладжуючого реактора;

$K_u = 2,34$  – коефіцієнт схеми випрямляча (для трифазної мостової схеми);

$K_c = 0,85$  – коефіцієнт, що враховує допустимі коливання напруги мереж;

$U_{ннн} = 400 \text{ В}$  – напруга перетворювача;

$U_{1л} = 6000 \text{ В}$  – напруга мережі перед трансформатором.

Коефіцієнт трансформації трансформатора:

$$K_m = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{6000}{365,7} = 16,41. \quad (2.30)$$

Значення струму фази в колі живлення перетворювача (вторинної обмотки):

$$I_2 = 1,5 \cdot I_H \cdot K_1 = 1,5 \cdot 61,57 \cdot 0,82 = 75,73 \text{ А}, \quad (2.31)$$

де:  $K_1 = 0,82$  – коефіцієнт схеми випрямлення за струмом трифазної мостової схеми.

Значення струму первинної обмотки:

$$I_1 = \frac{I_2}{K_m} = \frac{75,73}{16,41} = 4,615 \text{ А}. \quad (2.32)$$

Розрахункове значення типової потужності трансформатора:

$$S_m = \frac{\sqrt{3} \cdot (U_{1л} \cdot I_1 + U_{2л} \cdot I_2)}{2} = \frac{\sqrt{3} \cdot (6000 \cdot 4,615 + 365,7 \cdot 75,73)}{2} = 47964,0 \text{ ВА}. \quad (2.33)$$

Вибираємо силовий трансформатор типу ТМ-63 за умови  $S_{ТН} \geq S_T$ , паспортні дані якого наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні дані силового трансформатора ТМ-63

Тип трансформатора	$S_T$ , кВА	$U_{вн}$ , кВ	$U_{нн}$ , кВ	$\Delta P_{XX}$ , Вт	$\Delta P_{K3}$ , Вт	$U_{кз}$ , %
ТМ-63	63000	6,0	0,365	220	1280	4,5

Активний опір обмотки трансформатора:

$$R_{TP} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_{2л}^2}{S_{HTP}^2} = \frac{1280 \cdot 365,7^2}{63000^2} = 0,04313 \text{ Ом}. \quad (2.34)$$

Реактивний опір обмотки трансформатора:

$$X_{TP} = \frac{U_{K3} \cdot U_{2л}^2}{S_{HTP}} = \frac{0,045 \cdot 365,7^2}{63000} = 0,09553 \text{ Ом}. \quad (2.35)$$

Активний та індуктивний опори дроселя:

$$R_{ДР} = 0,1 \cdot R_{K3} = 0,1 \cdot 0,05039 = 0,005039 \text{ Ом}. \quad (2.36)$$

$$L_{ДР} = 0,1 \cdot \frac{X_{K3}}{2 \cdot \pi \cdot f_H} = 0,1 \cdot \frac{0,02441}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 7,77 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \quad (2.37)$$

### 2.3 Розрахунок природних характеристик електродвигуна вентилятора ВВД-6,3

Для розрахунку необхідних характеристик асинхронного електродвигуна скористаємося символьним методом комплексним методом розрахунку кіл змінного струму.

Комплексний опір ротора

$$Z_2(s) = \frac{r_2}{s} + j \cdot x_2$$

Комплексний опір ланцюгу намагнічування

$$Z_\mu = j \cdot x_\mu$$

Комплексний опір роторного кола схеми заміщення

$$Z_{20}(s) = \frac{Z_2(s) \cdot Z_\mu}{Z_2(s) + Z_\mu}$$

Комплексний опір ланцюгу статора

$$Z_1(s) = r_1 + j \cdot x_1$$

Повний комплексний опір схеми заміщення

$$Z_0(s) = Z_1(s) + Z_2(s)$$

Струм статора АД

$$I_1(s) = \frac{U_1}{Z_0(s)}$$

Напруга на затисках роторного кола

$$E_{20}(s) = U - I_1(s) \cdot Z_1(s)$$

Струм ротора АД

$$I_2(s) = \frac{E_{20}(s)}{Z_2(s)}$$

Електромагнітний момент АД

$$M_{эм}(s) = 3 \cdot (|I_2(s)|)^2 \cdot \frac{r_2}{\omega_0 \cdot s}$$

Активна та реактивна потужності, споживані АД з мережі :

$$P_{АД}(s) = 3 \cdot \mathbf{Re} \left( U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right); Q_{АД}(s) = 3 \cdot \mathbf{Im} \left( U_1 \cdot \hat{I}_1(s) \right)$$

Коефіцієнт корисної дії АД:

$$\eta(s) = \frac{M_{эм}(s) \cdot \omega_0 \cdot (1 - s)}{P_{АД}(s)}$$

Коефіцієнт потужності АД:

$$k_m(s) = \cos \left( \arg(Z_0(s)) \right)$$

Розрахунки по приведених вище формулах були виконані за допомогою сценарію MATLAB. Результати розрахунків швидкісних, електромеханічних і енергетичних характеристик електродвигуна вентилятора ВВД-6,3 приведені нижче на рис.2.3 – 2.7.

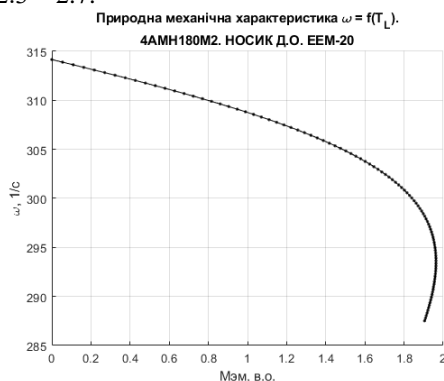


Рисунок 2.3 – Природна механічна характеристика електродвигуна вентилятора ВВД-6,3

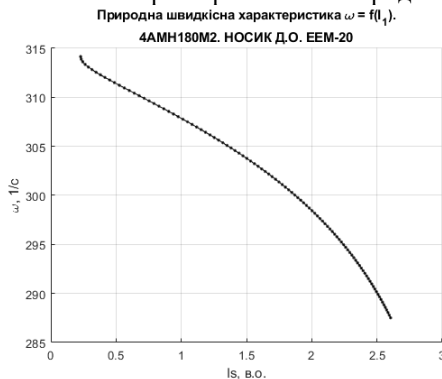


Рисунок 2.4 – Природна швидкісна характеристика електродвигуна вентилятора ВВД-6,3 за струмом статора

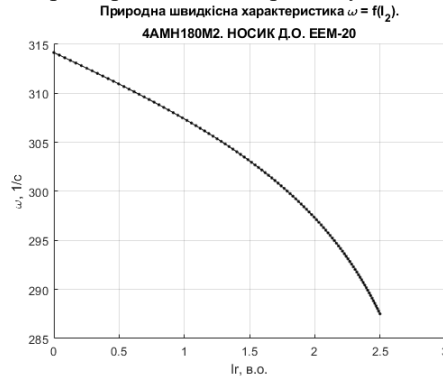


Рисунок 2.5 – Природна швидкісна характеристика електродвигуна вентилятора ВВД-6,3 за струмом ротора

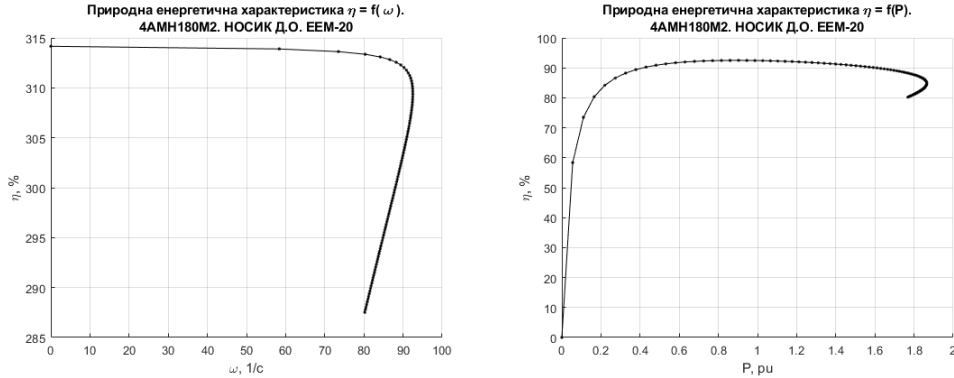


Рисунок 2.6 – Природна енергетична характеристика електродвигуна вентилятора ВВД-6,3 за ККД

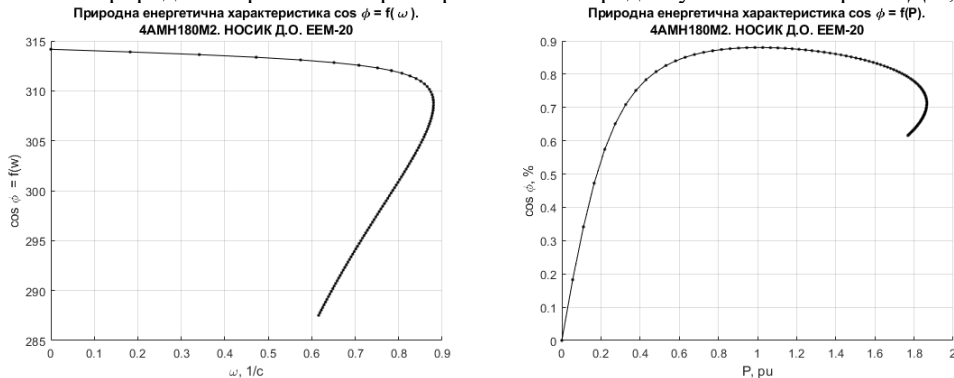


Рисунок 2.6 – Природна енергетична характеристика електродвигуна вентилятора ВВД-6,3 за коефіцієнтом потужності

### Висновки до другого розділу

У другому розділі обґрунтовано необхідність використання системи аварійного живлення обладнання оберткової печі випалювання вапна з метою уникнення важких технологічних наслідків аварійного відключення електроенергії. Розраховано потужність обладнання, що підлягає резервуванню.

Виконано розрахунок параметрів схеми заміщення приводного асинхронного двигуна нагнітального вентилятора типу АІР180М2У3 потужністю  $P_n = 30$  кВт з частотою обертання,  $n_n = 2950$  об/хв.

З використанням Т-подібної схеми заміщення комплексним методом розраховано природні електромеханічні, швидкісні та енергетичні характеристики асинхронного двигуна нагнітального вентилятора.

## СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

### Розділ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ АВР НА МАТЕМАТИЧНІЙ МОДЕЛІ

#### 3.1 Математичне моделювання динамічних режимів асинхронного двигуна у MATLAB/Simulink

Математична модель асинхронного двигуна з урахування вентиляторного характеру моменту опору з використанням елементів бібліотеки SimPower наведена на рис.3.1.

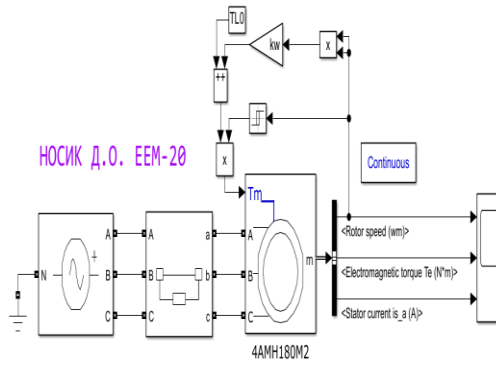
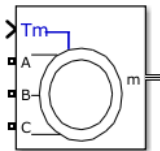
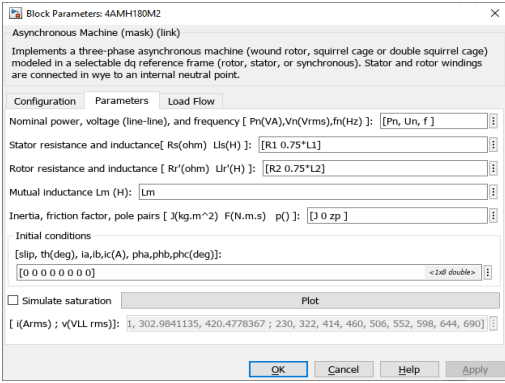
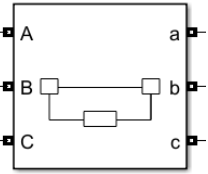
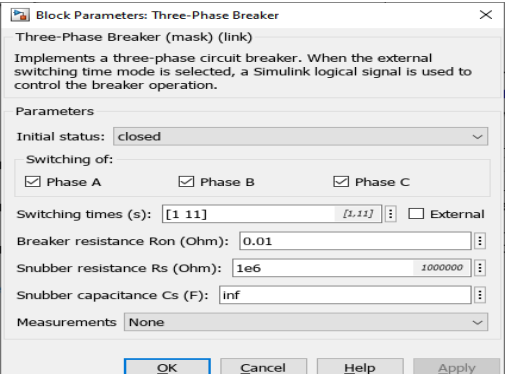
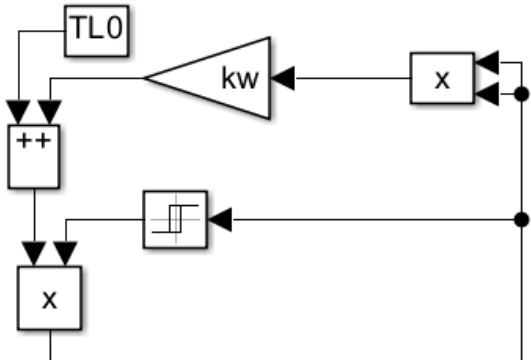


Рисунок 3.1 - Математична модель асинхронного двигуна вентилятора ВВД-6,3 з урахування реактивного характеру моменту опору

Для дослідження режимів роботи АД вентилятора при аварійному вимкненні живлячої напруги до моделі додано блок керованого трифазного вимикача.

Таблиця 3.1 – Основні блоки віртуальної моделі

Зображення елемента	Опис елемента
	<p>Блок, що моделює мережу 380 В, з'єднаний в зірку, з глухозаземленим «0».</p>

 	<p>Блок, що моделює роботу двигуна AIP180M2У3 з розрахованими параметрами.</p>
 	<p>Блок трифазного вимикача, що моделює зникнення живлячої напруги у та її включення за допомогою АВР</p>
	<p>Підсистема моделювання навантаження вентиляторного типу.</p>

Для розрахунку динамічних режимів використовувався вирішувач ode23tb з автоматичним вибором кроку інтегрування.

Вирішувач ode23tb використовується для жорстких систем диференціальних рівнянь, реалізує неявну формулу Рунге-Кутта з трапецієподібним кроком правила як першим етапом і формулою зворотного диференціювання.

Отримані результати розрахунків прямого пуску електроприводу вентилятора ВВД-6,3 наведено на рис.3.2.

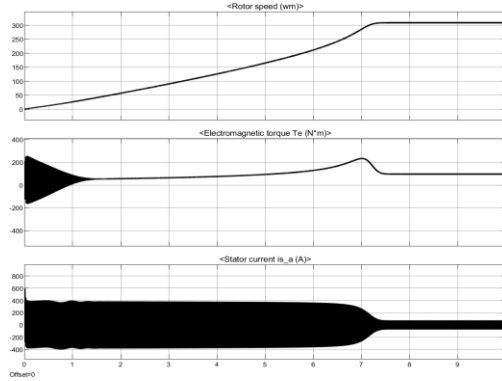


Рисунок 3.2 – Прямий пуск асинхронного електроприводу вентилятора ВВД-6,3

Отримані результати співпадають з відомими технічними характеристиками приводного двигуна і з теоретичними уявленнями про роботу асинхронного двигуна, що підтверджує адекватність цієї моделі.

На рис.3.3. приведено діаграми роботи асинхронного двигуна вентилятора ВВД-6,3 при вимиканні живлячої напруги в момент часу  $t = 1$  с.

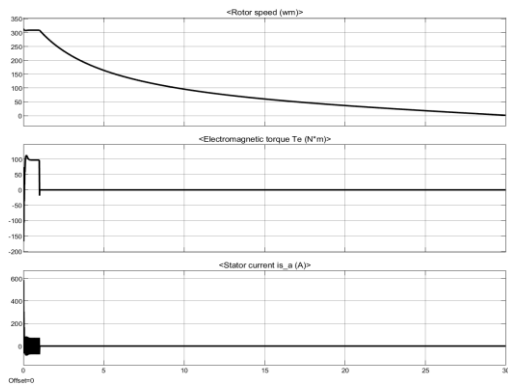


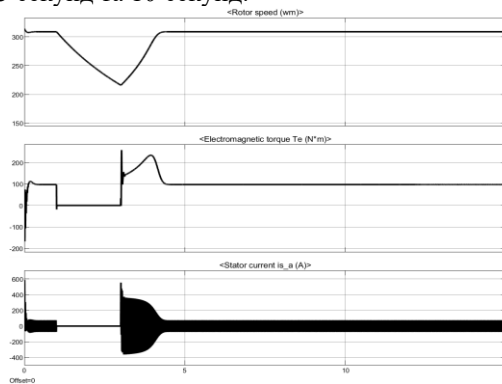
Рисунок 3.3 – Робота асинхронного двигуна вентилятора ВВД-6,3 при вимиканні живлячої напруги в момент часу  $t = 1$  с.

Час вибігу до повної зупинки двигуна при вимиканні живлячої напруги складає близько 30 с.

### 3.2 Визначення технічних вимог до системи автоматичного вмикання резерву

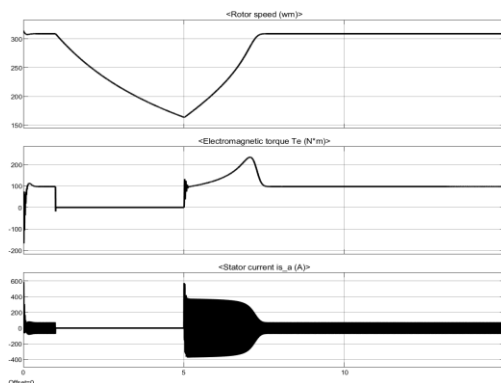
Для визначення технічних вимог до системи автоматичного вмикання резерву необхідно визначити показники роботи асинхронного двигуна вентилятора ВВД-6,3 при різній тривалості аварійної паузи електропостачання.

На рис. 3.4 наведено часові діаграми роботи асинхронного двигуна вентилятора ВВД-6,3 при перерві електропостачання тривалістю 5 секунд та 10 секунд.



а)





б)

Рисунок 3.3 – Діаграми роботи асинхронного двигуна вентилятора ВВД-6,3: а - при перерві електропостачання тривалістю 5 секунд; б - при перерві електропостачання тривалістю 10 секунд.

Як видно з наведених діаграм, тривалість паузи електропостачання впливає на мінімальну швидкість, до якої загальмовується двигун, а також впливає на тривалість відновлення усталеного режиму роботи вентилятора. Повторне вмикання асинхронного двигуна супроводжується практично пусковими струмами та дією ударних моментів.

Основною технічною характеристикою системи АВР є час перемикання споживачів на аварійну систему живлення при перерві основного електропостачання.

З метою визначення залежності просадки швидкості асинхронного двигуна вентилятора ВВД 6,3 та тривалості відновлення номінального режиму роботи від тривалості перерви електропостачання було виконано експериментальне дослідження на математичній моделі рис.3.1. Отримані результати наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати експериментального дослідження показників роботи системи АВР

Тривалість перериву електропостачання, $\Delta t$ , с	Просадка кутової швидкості електроприводу, $\Delta\omega$ , с	Тривалість відновлення усталеного режиму роботи, $\Delta T$ , с
1	55,5	0,874
2	93,00	1,406
3	122,20	1,969
4	145,20	2,562
5	163,60	3,062
6	178,90	3,469
7	191,80	3,844
8	203,10	4,156
9	212,90	4,531
10	221,50	4,875

Результати математичного експерименту було оброблено за допомогою інструменту Curve Fitter в середовищі MATLAB. За допомогою інструменту Curve Fitter було отримано регресійні моделі для даних експериментального дослідження. Зовнішній вигляд інструменту Curve Fitter наведено на рис. 3.4

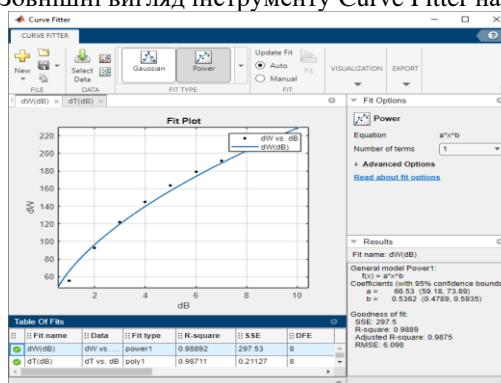


Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд інструменту Curve Fitter в середовищі MATLAB

За його допомогою було визначено структуру та параметри регресійних рівнянь, що описують результати експериментального дослідження.

На рисунку 3.5 наведено результати регресійного аналізу залежності просадки кутової швидкості електроприводу,  $\Delta\omega$ , с, від тривалості перериву електропостачання,  $\Delta t$ , с.

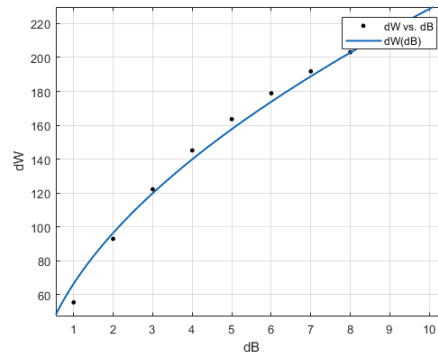


Рисунок 3.5 – Дані регресійного аналізу залежності просадки кутової швидкості електроприводу,  $\Delta\omega$ , 1/с, від тривалості перериву електропостачання,  $\Delta t$ , с

Нижче наведено протокол роботи інструменту Curve Fitter.

General model Power1:

$$f(x) = a \cdot x^b$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 66.53 \quad (59.18, 73.89)$$

$$b = 0.5362 \quad (0.4789, 0.5935)$$

Goodness of fit:

R-square: 0.9889

Adjusted R-square: 0.9875

RMSE: 6.098

Коефіцієнт регресії степеневій моделі Power1 складає 98,89 %, що свідчить про дуже добру відповідність моделі експериментальним даним.

На рисунку 3.6 наведено результати регресійного аналізу залежності тривалості відновлення усталеного режиму роботи,  $\Delta T$ , с, від тривалості перериву електропостачання,  $\Delta t$ , с

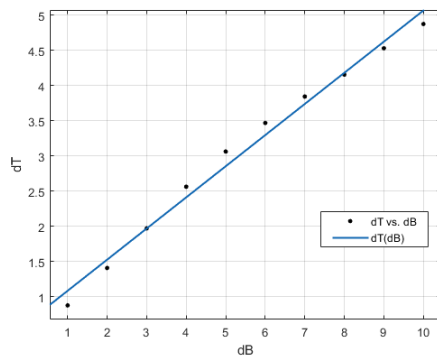


Рисунок 3.6 – Дані регресійного аналізу залежності тривалості відновлення усталеного режиму роботи,  $\Delta T$ , с, від тривалості перериву електропостачання,  $\Delta t$ , с

Нижче наведено протокол роботи інструменту Curve Fitter.

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1 \cdot x + p2$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 0.4429 \quad (0.4016, 0.4841)$$

$$p2 = 0.6391 \quad (0.3831, 0.8951)$$

Goodness of fit:

R-square: 0.9871

Adjusted R-square: 0.9855

RMSE: 0.1625

Коефіцієнт регресії лінійної моделі Poly1 складає 98,871 %, що свідчить про дуже добру відповідність моделі експериментальним даним.

### Висновки до третього розділу

У третьому розділі реалізовано математичну модель для дослідження роботи асинхронного двигуна привода нагнітального вентилятора в програмному середовищі MATLAB. За допомогою розробленої моделі розраховано діаграми процесу пуску асинхронного двигуна з урахуванням вентиляторного характеру моменту навантаження. Отримані результати підтверджують адекватність розробленої моделі. Розраховано процес вибігу асинхронного двигуна при зникненні живлячої напруги. Час вибігу до повної зупинки двигуна склав близько 30 секунд.

Для визначення технічних вимог до системи автоматичного ввімкнення резерву було виконано експериментальне дослідження математичної моделі асинхронного двигуна. Побудовано регресійні моделі залежності просадки кутової швидкості електроприводу,  $\Delta\omega$ , 1/с, від тривалості перериву електропостачання,  $\Delta t$ , с, та залежності тривалості відновлення усталеного режиму роботи,  $\Delta T$ , с, від тривалості перериву електропостачання,  $\Delta t$ , с. Регресійні моделі мають коефіцієнт регресії  $R > 95\%$ .

За результатами експериментального дослідження рекомендується розробляти систему автоматичного ввімкнення резерву з часом перемикання на резервне джерело живлення не більше за 5 секунд, що забезпечить практично повну безперервність технологічного процесу.