



УДК 62-83:621.313.3:004.896

# ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПРОМИСЛОВОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

## INNOVATIVE APPROACHES TO MODERNIZING ELECTRIC DRIVE SYSTEMS IN INDUSTRIAL REFRIGERATION PLANTS

<sup>1</sup>Шейда Голбад К.А., <sup>2</sup>Штепа Є.П.<sup>1,2</sup>Одеський національний технологічний університетORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8629-2619><sup>2</sup>E-mail: <sup>1</sup>kambiz@ukr.net<sup>1</sup>

Copyright © 2025 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>**DOI: 10.15673/atbp.v17i4.332**

**Анотація.** Системи глибокої заморозки відіграють ключову роль у забезпеченні тривалого зберігання харчової продукції без втрати її органолептичних властивостей. Одним із критично важливих компонентів таких систем є компресорне обладнання, від ефективності роботи якого залежить стабільність температурного режиму і, як наслідок, збереження продукту. У статті розглядається електропривод відцентрового компресора, який використовується у промисловій холодильній установці для зберігання заморожених продуктів.

Компресор є ключовим елементом парокомпресійної холодильної установки. Його основна функція полягає у стисканні пари холодоагенту, що надходить з випарника, до тиску, за якого можливе його конденсація за заданої температури навколишнього середовища. Модернізація обумовлена не тільки необхідністю підвищення надійності та точності регулювання компресорного агрегату, а також збільшення його енергоефективності. За оцінками міжнародних енергетичних агентств, електроприводи споживають понад 70% усієї електричної енергії, що виробляється у розвинених країнах, причому до 90% цього обсягу припадає на електроприводи промислових механізмів, зокрема насосів, вентиляторів і компресорів. Така структура споживання електроенергії зумовлює критичну важливість удосконалення електроприводних систем у контексті глобального енергозбереження. Розробка високоефективних, надійних та економічно доцільних систем електроприводу, що базуються на сучасних інтелектуальних алгоритмах керування та новітніх технологіях силової електроніки, є одним із пріоритетних напрямів розвитку інноваційної техніки. Застосування таких систем забезпечує не лише зменшення витрат електроенергії, а й підвищення точності керування технологічними процесами, що особливо актуально для галузей із підвищеними вимогами до стабільності умов зберігання, зокрема в холодильній промисловості.

У роботі розглянуто питання вдосконалення електроприводу компресора холодильного агрегату з метою підвищення його енергоефективності та забезпечення більшої надійності функціонування. Проведено детальний аналіз наявної системи електроприводу, визначено основні недоліки. Запропоновано шляхи модернізації із застосуванням частотного перетворювача та сучасних систем керування. Представлено результати розрахунків і аналіз енергетичної ефективності оновленого приводу.

**Abstract.** Deep freezing systems play a key role in the safe preservation of food products without wasting their organoleptic properties. One of the critically important components of such systems is the compressor equipment, which ensures the effectiveness of the work in maintaining temperature stability and, as a result, saving the product. The article shows the electric drive of the central compressor, which is used in industrial refrigeration units to preserve frozen products.

The compressor is a key element of a vapor compression refrigeration unit. Its main function is to compress the vapor of the refrigerant that comes from the evaporator, to the pressure, for any possible condensation at a given temperature



*in the excess medium. Modernization is driven not only by the need to improve the reliability and accuracy of control of the compressor unit, but also to increase its energy efficiency. According to estimates from international energy agencies, electric drives account for about 70% of the total electrical energy generated in Western countries, with up to 90% of this coming from industrial electric drives mechanisms, pumps, fans and compressors. This structure of electricity consumption underscores the critical importance of upgrading electric drive systems in the context of global energy conservation. Development of highly efficient, reliable and cost-effective electric drive systems, which are based on current intelligent algorithms and new power electronics technologies, one of the priority areas of development innovative technology. The installation of such systems will ensure not only a change in energy consumption, but also an increase in the accuracy of energy consumption by technological processes, which is especially important for galusa with mobility to the stability of minds of conservation, protection in refrigeration industry.*

*The robot examines the power supply to the electric drive of the compressor of the refrigeration unit in order to increase its energy efficiency and ensure greater reliability of operation. A detailed analysis of the existing electric drive system was carried out, and the main shortcomings were identified. The paths of modernization due to the stagnation of frequency redesign and current servicing systems have been established. The results of the design and analysis of the energy efficiency of the updated drive are presented.*

**Ключові слова:** електропривід, відцентрований компресор, холодильна установка, частотний перетворювач, математичне моделювання.

**Keywords:** electric drive, centrifugal compressor, refrigeration unit, frequency converter, mathematical modeling

### Вступ

Забезпечення якісного та тривалого зберігання м'ясних продуктів, є важливим елементом технологічного процесу на підприємствах харчової промисловості, логістичних центрах та складських комплексах, якій потребує дотримання стабільного температурного режиму, зазвичай у межах від  $-18^{\circ}\text{C}$  до  $-25^{\circ}\text{C}$ , що забезпечується за допомогою спеціалізованих холодильних установок. Ефективність функціонування холодильного обладнання безпосередньо впливає на якість продукції, строки її зберігання та санітарно-гігієнічні умови. Недотримання температурного режиму може призвести до псування м'яса, втрати його харчової цінності або навіть до створення умов для розвитку патогенної мікрофлори. Тому надійність і стабільність роботи холодильної системи є критично важливою.

З технічного погляду, сучасні холодильні установки для зберігання замороженого м'яса складаються з низки взаємопов'язаних компонентів: компресорів, теплообмінників, систем автоматики та управління. Електропривід компресора є одним із ключових елементів, що визначає загальну енергоефективність системи та стабільність її роботи. У зв'язку з цим актуальним є питання модернізації електроприводу з використанням сучасних технологій – зокрема, частотного регулювання та енергоощадних алгоритмів керування.

Розробка та впровадження технічно досконалої та енергозберігаючої системи електроприводу дозволяє не лише зменшити енергоспоживання, а й підвищити надійність холодильної установки в цілому, що має безпосередній вплив на ефективність технологічного процесу зберігання замороженого м'яса. Модернізація електроприводу компресора – особливо із застосуванням частотно-регульованого приводу (ЧРП) – дозволяє точніше та швидше регулювати продуктивність холодильної установки. Це призводить до стабільності температури (без стрибків) в камерах глибокого заморожування, запобігає частковому розморожуванню і повторному заморожуванню, що зберігає структуру тканин і вміст вологи продуктів. Зниження теплових коливань мінімізує розвиток мікробіологічних процесів та окислення жирів. Більш точне керування дозволяє швидше реагувати на завантаження/розвантаження камер, що покращує гігієнічні та санітарні умови зберігання.

### Аналіз останніх досліджень.

У сучасній науково-технічній літературі і практиці велика увага приділяється підвищенню ефективності холодильних систем через модернізацію електроприводів, застосування систем частотного регулювання, інтелектуального управління. Дослідження показують, що використання частотного перетворювача (variable-frequency drive, VFD) дозволяє адаптувати швидкість обертання компресора під фактичне навантаження, що зменшує енергоспоживання в порівнянні із стандартними нерегульованими приводами.

Зокрема, увагу привертають дослідження високошвидкісних роторних компресорів. У таких роботах вивчають, як збільшення частоти обертання (до дуже високих значень) впливає на втрати через витік газу, втрати при стисненні, на ефективність загалом. Так, в одному експерименті показано, що при частоті понад  $\sim 160$  Гц (у роторних компресорів) спостерігається значне зростання втрат, що знижує корисну ефективність [1].

Як показано у дослідженнях високошвидкісних компресорів, зростання частоти обертання призводить до зростання втрат (витік, тертя, випуск-сжаття тощо). Це обмежує корисність застосування дуже високих частот без спеціальних конструкцій або нових матеріалів [5].

Хоча існують дослідження у сфері моделювання і реального управління, ще не всі методики доведені в промислових умовах. На підставі розглянутих досліджень можна зробити висновок, що використання частотних перетворювачів і регульованих приводів — один з найефективніших шляхів підвищення надійності, точності керування та енергоефективності компресорних установок, особливо коли навантаження змінюється.

**Мета роботи**

Метою даної роботи є підвищення енергоефективності та надійності роботи холодильної установки для зберігання замороженого м'яса шляхом модернізації електроприводу компресора.

**Завдання дослідження.** Для досягнення поставленої мети в рамках даної роботи необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості роботи холодильних установок у харчовій промисловості;
- дослідити існуючу систему електроприводу компресора холодильної установки, виявити її недоліки та обмеження у плані енергоефективності та надійності;
- обґрунтувати доцільність модернізації електроприводу з урахуванням технічних, економічних та енергетичних факторів;
- розробити технічне рішення щодо модернізації системи електроприводу із застосуванням частотного перетворювача та сучасних систем управління;
- виконати розрахунок параметрів оновленої системи, оцінити її енергоефективність та порівняти з вихідним варіантом.

**Матеріали та методи досліджень.**

Для холодильних установок, які зберігають заморожене м'ясо, особливо важливо підтримувати стабільні температурні режими, тому системи регулювання повинні бути високої надійності, із запасом стійкості до змін умов. У великих промислових холодильних установках, призначених для глибокого заморожування м'ясної продукції, застосовуються центробіжні (турбо) компресори, зокрема типу К-250-61-5. Турбокомпресор К-250-61-5 є одноступеневим центробіжним компресором з горизонтальним розташуванням вала, що призначений для стискання охолодженого повітря. Робочий процес відбувається за рахунок дії відцентрової сили, яка виникає при обертанні робочого колеса, і забезпечує приріст тиску холодоагенту [1].

**Таблиця 1 - Основні технічні характеристики компресора К-250-61-5**

| Параметр  | Значення                   |
|---|----------------------------|
| Продуктивність (залежно від режиму), м <sup>3</sup> /хв         | 145 - 255                  |
| Кінцевий абсолютний тиск, кгс/см <sup>2</sup>                   | 9,0                        |
| Напруга електродвигуна, кВ                                      | 6,0 / 10,0                 |
| Частота обертання ротора, об/хв                                 | 10935                      |
| Потужність, кВт   | в діапазоні ~1000 ... 1500 |
| Потужність електродвигуна, кВт (модель СТД-1600)                | 1600                       |
| ККД ступеня стискання (у залежності від режиму навантаження), % | 70-88                      |
| Система охолодження корпусу і підшипників                       | водяне                     |

Розрахунок потужності на валу електродвигуна. Механічна потужність, що передається на вал компресора, визначається за формулою:

$$P = \frac{m(h_2 - h_1)}{\eta}$$

де  $m$  - масова витрата холодоагенту, кг/с;

$h_2 - h_1$  - приріст ентальпії холодоагенту в процесі стискання, кДж/кг;

$\eta$  - загальний ККД компресора (включаючи механічні втрати та втрати стискання).

У випадку, коли параметри подано в об'ємних одиницях, застосовується модифікована формула:

$$P = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_1 \cdot Q}{\eta} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

де  $Q$  - об'ємна витрата, м<sup>3</sup>/с;

$p_2, p_1$  - тиск на вході та виході, Па;

$\gamma$  - показник адіабати.

Номинальна продуктивність компресора К-250-61-5 при типових умовах (використання повітря) близько 250 м<sup>3</sup>/хв, що відповідає:

$$Q = \frac{250}{60} = 4,17 \text{ м}^3/\text{с}$$

Густина залежить від температури та тиску і для повітря її можна розрахувати за законом ідеального газу:

$$\rho = \frac{p_1}{R \cdot T} = \frac{150000}{287 \cdot 253,15} = 2,07 \text{ кг/м}^3$$

де  $p_1$  - тиск на вході, Па (150 000 Па)

$R$  - індивідуальна газова стала для повітря, 287 Дж/(кг·К)

$T$  - температура газу в Кельвінах (-20 °С = 253,15 К)



Показник адіабати, або політропний коефіцієнт - відношення теплоємностей при сталому тиску і сталому об'ємі. Для сухого повітря, яке вважається ідеальним двоатомним газом (основні компоненти — азот N<sub>2</sub> та кисень O<sub>2</sub>), цей коефіцієнт має стандартне значення:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

де  $c_p$  - теплоємність при сталому тиску;

$c_v$  - теплоємність при сталому об'ємі.

$$c_p \approx 2190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$

$$c_v \approx 1650 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$

$$\gamma = \frac{2190}{1650} = 1,33$$

$$P = \frac{1,33}{1,33 - 1} \cdot \frac{150000 \cdot 4,17}{0,75} \cdot \left[ \left( \frac{850000}{150000} \right)^{\frac{1,33-1}{1,33}} - 1 \right] \approx 2018000 \text{ Вт} = 2018 \text{ кВт}$$

До модернізації компресор холодильної установки, як і більшість відцентрових компресорів великої потужності, комплектувався електродвигуном типа СТД-1600-23УХЛ4 потужністю 160кВт, напругою 6000В, з частотою обертання 3000об/хв. Але синхронні двигуни мають низку недоліків:

- синхронний двигун не може самостійно запуститися без спеціального пускового пристрою або системи збудження. Це ускладнює пускові процедури та вимагає додаткового обладнання, підвищує загальну складність та вартість системи;

- якщо двигун втрачає синхронізм через коливання навантаження або перебої в збудженні, він може аварійно зупинитися;

- наявність контактних кілець, щіток та обмоток збудження створює додаткові точки зносу. Це вимагає частіших перевірок та ремонтів;

- синхронний двигун нестійкий до раптових змін навантаження, особливо в динамічних режимах роботи, які можуть виникати в роботі компресорного обладнання [3].

Ці недоліки суттєво знижують загальну ефективність та надійність холодильної системи. Заміна синхронного двигуна СТД-1600-23УХЛ4 на трифазний асинхронний двигун 4АЗМ-1600/6000 потужністю 160кВт, напругою 6000В, частотою обертання 3000об/хв дозволяє підвищити надійність, спростити експлуатацію та зменшити витрати на технічне обслуговування. Асинхронний двигун краще пристосований до умов промислової експлуатації та динамічних режимів роботи, що робить його оптимальним вибором для компресорних установок такого типу [2].

У новій конфігурації компресорної установки передбачено використання частотного перетворювача (ЧП) серії АВВ ACS2000 для керування асинхронним електродвигуном. Це рішення має низку технічних і економічних переваг:

- плавний запуск та зупинка двигуна дозволяє уникнути високих пускових струмів, знижує механічні навантаження на вузли компресора при запуску;

- завдяки можливості регулювання швидкості обертання, двигун споживає рівно стільки електроенергії, скільки потрібно для поточного режиму роботи, що особливо актуально при змінних навантаженнях;

- частотний перетворювач дозволяє точно регулювати частоту обертання електродвигуна, а отже і продуктивність компресора, адаптуючи її під потреби технологічного процесу;

- сучасні частотні перетворювачі мають вбудовані функції захисту від перевантаження, перегріву, короткого замикання, перекосу фаз тощо. Це підвищує загальну безпеку та надійність системи;

- завдяки плавному пуску та гальмуванню значно зменшуються динамічні удари, що скорочує знос муфт, підшипників та інших механічних елементів;

- частотний перетворювач легко інтегрується в сучасні системи керування, дозволяє реалізувати автоматичне регулювання, дистанційний контроль та діагностику.

Також, у змінно-навантажених режимах ПЧ знижує кількість пусків компресора в 2–3 рази, що продовжує термін служби двигуна до 25%. В свою чергу, зменшення електроспоживання означає зменшення непрямих викидів CO<sub>2</sub>. Використання ПЧ не лише підвищує енергоефективність, але й дозволяє підприємству зменшити свій вуглецевий слід, що відповідає цілям сталого розвитку та корпоративної екологічної відповідальності. Частотне регулювання також зменшує теплові втрати в обмотках двигуна, що дозволяє зменшити ризик перегрівання.

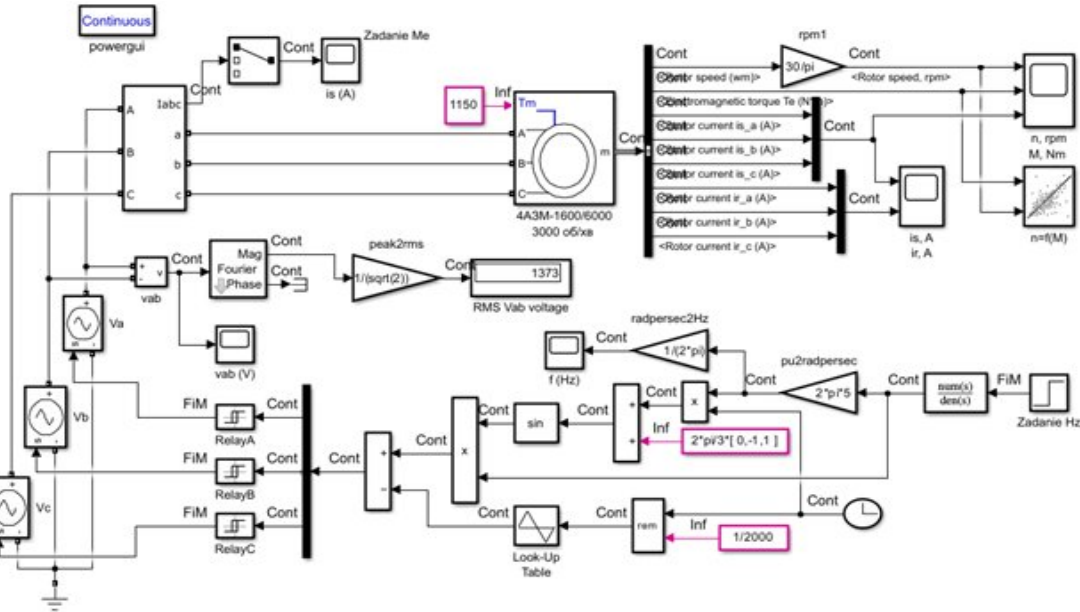
**Обґрунтування установки АВВ ACS2000 на асинхронний двигун.** Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна визначається за формулою:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \cdot (1 - s)$$



де  $n$  - швидкість обертання ротора, об/хв,  
 $f$  - частота живлення, Гц,  
 $p$  - число пар полюсів,  
 $s$  - ковзання.

Зміна частоти  $f$  дозволяє точно регулювати швидкість двигуна, що є основною функцією частотного перетворювача.



**Рис. 1 - Схема моделі холодильної установки з ПЧ**  
**Fig. 1. Block diagram of the refrigeration unit model with a VFD**

Асинхронні двигуни часто працюють у неповному навантаженні. При цьому споживання електроенергії не є оптимальним. Частотний перетворювач дозволяє зменшити частоту та напругу при неповному навантаженні, що веде до зниження втрат:

$$P_{\text{втрат}} \propto I^2 \cdot R$$

де  $I$  - струм двигуна,  
 $R$  - активний опір обмоток.

Зниження струму при частковому навантаженні значно зменшує теплові втрати в обмотках [2].

Пусковий струм асинхронного двигуна без перетворювача часто у 6–8 разів перевищує номінальний:

$$I_{\text{пуск}} \approx (6 - 8) \cdot I_{\text{ном}}$$

Із застосуванням частотного перетворювача:

$$I_{\text{пуск}} \approx (1 - 1.5) \cdot I_{\text{ном}}$$

Це зменшує механічні навантаження на двигун та знижує вимоги до енергосистеми. До тогож, АВВ ACS2000 має вбудовані функції, що забезпечує покращення якості керування та захисту двигуна:

- керування моментом (V/f, DTC — Direct Torque Control);
- моніторинг стану двигуна;
- захист від перенавантаження, перегріву, короткого замикання [3].

Використання DTC (пряма передача моменту) дозволяє бездатчикове регулювання моменту з високою точністю:

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega_s} \cdot \left( \frac{E_r I_r}{R_r} \right)$$

де  $T$  - електромагнітний момент;  
 $P$  - число полюсів;  
 $\omega_s$  - синхронна кутова швидкість;  
 $E_r I_r$  - ЕРС та струм ротора відповідно;  
 $R_r$  - опір ротора.

**Результати дослідження моделі електроприводу з використанням ПЧ (за скалярним законом).**

Проведено імітаційне моделювання у таких режимах:

- пуск двигуна з ПЧ — аналіз струмового навантаження та плавності запуску;
- робота при частковому навантаженні (зниження частоти обертання до 70%, 50%);
- порівняння з традиційним запуском "пуск – стоп" — за рівнем споживаної потужності та пікових струмів.

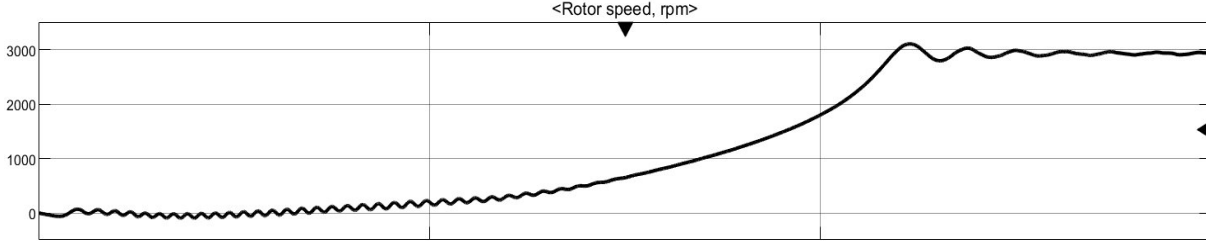


Рис. 2 - Динамічна характеристика зміни швидкості АД при  $f_1 = 50$  Гц

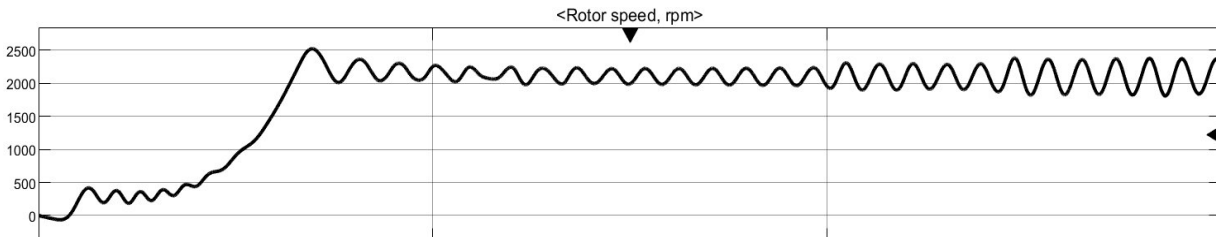


Fig. 2. Dynamic response of the induction motor speed under  $f_1 = 50$  Гц  
Рис. 3 - Динамічна характеристика зміни швидкості АД при  $f_1 = 35$  Гц

Fig. 3. Dynamic response of the induction motor speed under  $f_1 = 35$  Гц

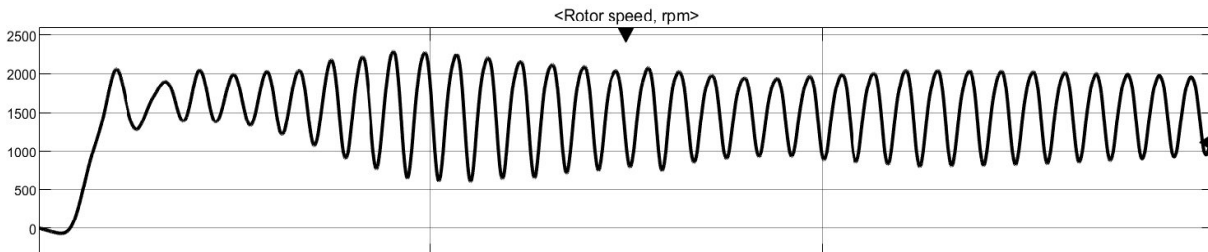


Рис. 4 - Динамічна характеристика зміни швидкості АД при  $f_1 = 25$  Гц.  
Fig. 4. Dynamic response of the induction motor speed under  $f_1 = 25$  Гц.

Fig. 4. Dynamic response of the induction motor speed under  $f_1 = 25$  Гц.

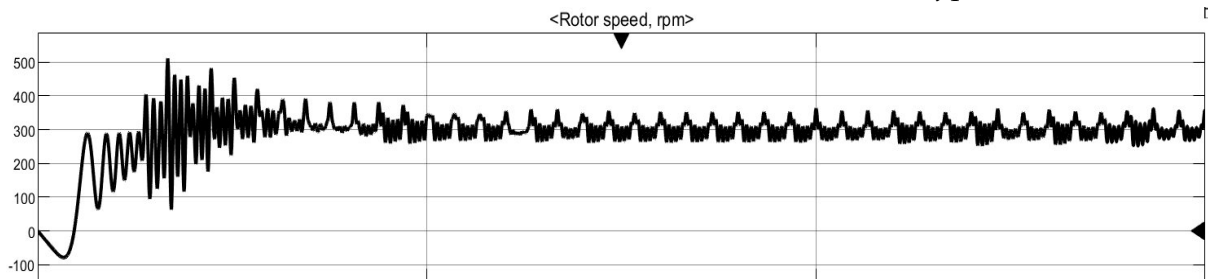


Рис. 5 - Динамічна характеристика зміни швидкості АД при  $f_1 = 5$  Гц.  
Fig. 5. Dynamic response of the induction motor speed under  $f_1 = 5$  Гц.

Fig. 5. Dynamic response of the induction motor speed under  $f_1 = 5$  Гц.

**Висновки.** Модернізація електроприводу холодильної установки з використанням частотно-регульованого приводу та сучасних систем керування дозволяє значно підвищити енергоефективність системи, надійність та довговічність обладнання, знизити експлуатаційні витрати, покращити плавність керування компресором. Результати моделювання свідчать про доцільність впровадження електроприводу з частотним регулюванням у промислових холодильних установках.

#### Список літератури

1. Білецький, В.С. Основи енергозбереження: навчальний посібник. - Донецьк: Східний видавничий дім, 2011. - 256 с.
2. Винокуров, Є.О. Промислове холодопостачання. — Львів: Видавництво ЛНТУ, 2019. — 198 с
3. Жуков, М.Ф., Козлов, Ю.М., Павлов, А.Н. Електропривод. Теорія та практика. — Київ: Лібра, 2020. — 312 с.
4. [https://arxiv.org/abs/2407.11080?utm\\_source=chatgpt.com](https://arxiv.org/abs/2407.11080?utm_source=chatgpt.com)
5. <https://refindustry.com/news/market-news/case-study-shows-20-energy-savings-with-an-embraco-variable-speed-compresso>

Отримана в редакції 21.11.2025. Прийнята до друку 08.12.2025. Received 21 November 2025. Approved 08 December 2025. Available in Internet 30 December 2025