

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Інститут електродинаміки
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БІБІК ОЛЕНА ВАСИЛІВНА

УДК 621.3313.333

ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ТА РОЗРОБЛЕННЯ ЗАСОБІВ
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ І
АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Спеціальність 05.09.01 – електричні машини і апарати

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.В. Бібик

Науковий консультант Мазуренко Леонід Іванович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Бібік О.В. Розвиток теорії та розроблення засобів підвищення енергоефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів із змінним навантаженням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – Інститут електродинаміки Національної академії наук України, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню енергоефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів для систем зі змінним навантаженням, які широко використовуються в промисловості, комунальному господарстві, побутовій техніці. Проблему підвищення енергоефективності асинхронних двигунів у складі механізмів зі змінним навантаженням традиційно розв'язують шляхом їх оптимального проектування за умов сталих режимів роботи, вибору маховиків, використання АД з підвищеним ковзанням та регульованих АД з короткозамкненим ротором і перетворювачами частоти. Альтернативу останнім створюють керовані вентильно-індукторні двигуни з реактивним ротором (ВІД), які відрізняються технологічністю, надійністю, енергоефективністю

Режими роботи АД і ВІД є квазісталими, які пов'язані з періодичною зміною моменту опору і, відповідно, частоти обертання ротора. Наявність значних пульсацій частоти обертання ротора, струмів та електромагнітних моментів призводить до погіршення енергетичних показників асинхронних двигунів та зниженню їх енергоефективності. Дослідженню регульованих вентильно-індукторних і асинхронних двигунів з перетворювачами частоти та формуванню їх енергоефективних характеристик робочих режимів з врахуванням періодичності навантаження приділена недостатня увага.

В результаті огляду і аналізу існуючих підходів розроблення електромеханічних перетворювачів енергії для систем зі змінним навантаженням, перспектив розвитку електричних машин, вимог до розроблення конкурентно-спроможних двигунів з урахуванням потреб насосного і компресорного обладнання

обґрунтовано актуальність напрямку досліджень, який полягає у подальшому розвитку теоретичних засад створення енергоефективних вентильно-індукторних і асинхронних двигунів з врахуванням особливостей навантаження.

В роботі вирішена актуальна науково-прикладна проблема розвитку теорії електричних машин в напрямку розроблення математичних моделей, уточнення характеру протікання електромагнітних і електромеханічних процесів, розроблення концепції оптимального проектування, принципів керування вентильно-індукторними і асинхронними двигунами з врахуванням особливостей навантаження та розроблення заходів з підвищення їх енергоефективності в робочих режимах.

Запропоновано загальну структуру математичної моделі для дослідження квазісталих режимів електромеханічних перетворювачів енергії, як складових електромеханічних систем зі змінним навантаженням, яка включає динамічні математичні моделі асинхронних і вентильно-індукторних двигунів, навантаження, що забезпечує на основі розробленого алгоритму розрахунків інтегральних значень частоти обертання ротора, струмів, моментів та їх пульсацій, коефіцієнтів корисної дії двигунів на періоді повторення у квазісталих режимах та їх порівняння з результатами розрахунків зі сталим моментом опору, який дорівнює середньому значенню періодичного моменту навантаження. Це дозволило уточнити характер протікання електромагнітних і електромеханічних процесів та підвищити адекватність математичного моделювання двигунів у квазісталих режимах.

За допомогою розроблених математичних моделей досліджено вплив періодичності навантаження на характер зміни часових залежностей частоти обертання ротора, струмів, електромагнітних моментів та динамічні електромеханічні характеристики трифазних шестіполюсних АД потужністю 700 Вт і 11 кВт та однофазних чотири та двополюсних АД потужністю 30, 100 і 200 Вт. Завдяки уточненню пульсацій частоти обертання ротора $\delta\omega_r$, струмів статора δi_s і ротора δi_r , електромагнітних моментів ΔM двигунів та ККД у квазісталих режимах в порівнянні зі сталим моментом опору обґрунтована необхідність врахування

особливостей навантаження та розрахунку показників АД у квазісталих режимах з врахуванням періоду повторювання.

З метою селекції нерегульованих АД, для яких комплексне проектування з урахуванням особливостей зміни моменту опору є доцільним для підвищення енергоефективності режимів роботи, запропоновано критерій інтенсивних квазісталих режимів, який розраховується як відношення механічної постійної двигунів до електромагнітної та залежить від числа пар полюсів, критичних значень моменту і ковзання, моменту інерції привода. Ефективність квазісталих режимів залежить від співвідношення цих постійних часу. За допомогою запропонованого критерію проведено аналіз серійних АД у діапазоні потужностей 60 Вт ... 11 кВт, визначені двигуни, які потребують удосконалення для їх роботи зі змінним навантаженням.

На основі розроблених підходів розвинуто концепцію оптимального проектування асинхронних двигунів з врахуванням перехідних процесів за умови змінного навантаження, яка базується на отриманих аналітичних залежностях коефіцієнта корисної дії у квазісталих режимах від конструктивних параметрів, та дозволяє визначити резерв підвищення ККД у порівнянні з оптимальним проектуванням двигунів у сталих режимах. Обґрунтовано можливість підвищення ККД у квазісталих режимах до 8...10 % на прикладі трифазного двигуна 4А80А6У3 з пульсуючим навантаженням за допомогою побудованих вперше аналітичних залежностей ККД від довжини пакета і числа ефективних провідників обмотки статора при їх варіюванні у діапазоні ± 10 .

Розроблено вперше комплексну математичну модель частотно-регульованих АД приводів поршневих компресорів з врахуванням періодичного навантаження, нелінійності електромагнітних параметрів, несиметрії та несинусоїдності процесів, що дозволяє проводити уточнений аналіз режимів їх роботи за зміни частоти і напруги живлення.

Вперше виявлено з використанням критерію інтенсивних квазісталих режимів, який запропоновано для оцінки протікання електромагнітних і електромеханічних процесів та ефективності цих режимів, області критичного зниження ККД (більш

ніж на 10%) нерегульованого і частото-регульованого асинхронних двигунів поршневих одноциліндрових компресорів, що науково обґрунтовує необхідність розробки заходів з підвищення ефективності двигунів в робочих режимах.

Розвинуто теоретичні засади проектування вентиляно-індукторних двигунів, які включають методику їх пропорційного перерахунку і концепцію оптимального проектування. Методика базується на зв'язку енергетичних показників машин базової та нової, яка розробляється на задані потужність і частоту обертання і геометрично їй подібна, з їх лінійними розмірами, числом витків і активним опором обмотки, дозволяє визначити конструктивні параметри нової машини та забезпечує скорочення часу вибору варіантів ВІД на етапі попереднього проектування. Концепція оптимального проектування вентиляно-індукторних двигунів базується на використанні аналітичних залежностей максимального і середнього електромагнітного моментів та їх пульсацій тощо від внутрішнього діаметра статора, кутових величин полюсів статора і ротора, що дозволяє підвищити ефективність проектування ВІД і отримати оптимальний його варіант із заданим середнім електромагнітним моментом з мінімальними пульсаціями. За допомогою запропонованих підходів розроблено ВІД з покращеними технічними показниками і меншою масою активних матеріалів.

Розроблено математичні моделі ВІД, в яких враховано взаємний вплив індукторної машини, комутатора, системи керування, періодичного характеру навантаження, з використанням нелінійних залежностей індуктивності фази статора від струму та кута повороту ротора та розроблених ефективних алгоритмів регулювання частоти обертання двигунів. За допомогою чисельних досліджень обґрунтовано доцільність врахування періодичного навантаження при розрахунках відносних пульсацій частоти обертання ротора ВІД у робочих діапазонах, що дозволяє підвищити адекватність математичного моделювання квазісталих режимів.

Розроблено у габаритах двигуна 4AA56A4 дослідний зразок ВІД з комутатором з С-скиданням і коливальним поверненням енергії, який дозволяє підвищити ККД до 7% у порівнянні з асинхронним двигуном, забезпечує надійний плавний пуск при зниженні напруги та діапазон регулювання частоти обертання 1:5.

Достовірність результатів математичного моделювання ВІД підтверджено співставленням результатів чисельних та експериментальних досліджень, розбіжності значень струмів фаз і ККД не перевищують відповідно 8,5% і 7%.

На основі чисельних і експериментальних досліджень науково обґрунтовано принципи керування частотою обертання вентильно-індукторними двигунами та її стабілізації шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації, що забезпечують їх енергоефективні режими роботи у складі систем зі змінним навантаженням. Вперше розроблено алгоритми регулювання частоти обертання ВІД з врахуванням періодичного навантаження одноциліндрових поршневих компресорів при зміні напруги живлення і кутів комутації із забезпеченням максимальних значень ККД і необхідного регламентованого рівня пульсацій частоти обертання роторів (20%) у робочому діапазоні 1:6.

За результатами комплексного дослідження на основі використання розробленої математичної моделі насосної установки багатоповерхового житлового будинку визначено із забезпеченням максимального коефіцієнта енергоефективності системи оптимальні режими роботи АД при регулюванні частоти і напруги живлення з врахуванням навантаження ЕМС, які дозволяють підвищити енергоефективність асинхронних двигунів і системи водопостачання до 23 % в порівнянні з нерегульованим АД.

Розроблено рекомендації щодо *селекції і вдосконалення АД* для підвищення енергоефективності в робочих режимах у складі систем зі змінним навантаженням, використання *нерегульованих* трифазних АД і регульованих АД з перетворювачами частоти і ВІД для насосів та поршневих одно- і двоциліндрових компресорів, регулювання і стабілізації частоти обертання ротора ВІД згідно технічних і технологічних вимог.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун, асинхронний двигун, змінне навантаження, квазісталі режими, проектування, керування, коефіцієнт корисної дії, пульсації.

Список публікацій здобувача

1. Войтех А.А., Попович А.Н., Библик Е.В. Математическая модель для исследования рабочих характеристик асинхронного двигателя, нагруженного вибратором. *Науч. труды КГПУ «Пробл. создания новых машин и технологий»*. 2001. Вып. 1(10). С. 300-303 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі АД, який навантажено вібратором).
2. Войтех А.А., Попович А.Н., Библик Е.В. Математическая модель оптимального проектирования асинхронного двигателя с предвключенными конденсаторами для тяжелых условий пуска. *Наук. праці КДПУ*. 2002. Вип. 1(12). С. 361-363 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі АД з конденсаторами у колі статора і мережі для оптимального проектування у складі ЕМС).
3. Войтех А.А., Попович А.Н., Библик Е.В. Учет коэффициента мощности при оптимизации электромеханических систем для переходных и квазиустановившихся режимов работы. *Техническая электродинамика*. 2003. № 2. С. 36-42 (Особистий внесок – аналіз існуючих методів та обґрунтування способу розрахунку коефіцієнта потужності при оптимізації ЕМС у квазісталих режимах).
4. Біблік О.В., Попович О.М. Врахування квазистатичних режимів при розробці асинхронних двигунів із змінним характером навантаження. *Наук. праці КДПУ*. 2004. Вип. 3(26). С. 23-24 (Особистий внесок – чисельні дослідження, обґрунтування вибору періоду повторювання АД у квазісталих режимах).
5. Библик Е.В. Исследование динамических режимов асинхронных двигателей в составе электромеханических систем с целью их оптимального проектирования. *Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины*. 2004. № 2(8). С. 129.
6. Попович О.М., Біблік О.В., Шуруб Ю.В. Покращення техніко-економічних характеристик електромеханічних систем шляхом комплексного проектування. *Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины*. 2005. № 2(11). Ч.1. С. 104-107 (Особистий внесок – обґрунтування доцільності застосування комплексного проектування АД у складі ЕМС).

7. Попович О.М., Бібік О.В., Шуруб Ю.В., Головань І.В. Моделі та методи для комплексного дослідження та проектування електромеханічних систем. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2006. № 2(14). С. 68-71 (Особистий внесок – дослідження, порівняння і оцінка розбіжностей результатів розрахунків квазісталих і сталих режимів).

8. Бібік О.В. Аналіз квазістатичних режимів асинхронного електропривода з метою підвищення його енергоефективності. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2007. № 1(16). С. 119-120.

9. Бібік О.В., Попович О.М. Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу в квазістатичних режимах роботи. *Електротехніка і електромеханіка*. 2007. № 3. С. 12-14 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі і алгоритму оптимального проектуванні АД з урахуванням періодичного навантаження).

10. Бібік О.В. Формування критерію визначення ефекту від урахування квазістатисти. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2008. Вип. 20. С. 40.

11. Лісник В.Я, Попович О.М., Бібік О.В., Шуруб Ю.В. Математичні моделі, методи дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин із особливостями живлення та навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 5. С. 42-44 (Особистий внесок – розроблення підходу для оптимального проектування АД з урахуванням квазісталих режимів).

12. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Шуруб Ю.В., Головань І.В., Вербовий А.П., Джура О.В. Електромеханічні перетворювачі енергії. *Пр. Ін-ту електродинаміки АНН України*. 2009. Вип. 23. С. 48-56 (Особистий внесок – розроблення засобів математичного моделювання і дослідження ВІД зі змінним навантаженням).

13. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Джура О.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І. Електромеханічні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 29. С. 62-70 (Особистий внесок –

дослідження режимів роботи конденсаторних АД та формування задач по створенню ВІД підвищеної ефективності для ЕМС з періодичним навантаженням).

14. Бібік О.В. Формування енергоефективних режимів роботи однофазних асинхронних конденсаторних двигунів з періодичним навантаженням. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 33. С. 45-53.

15. Бібік О.В., Мазуренко Л.І., Жуков Л.О. Дослідження квазістатичних режимів вентильно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. 2012. № 3. С. 416-418. Темат. випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" (Особистий внесок – математична модель, дослідження режимів, висновки).

16. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І. Електричні генератори і двигуни змінного струму. Електромеханотронні перетворювачі енергії. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2013. Вип. 35. С. 58-67 (Особистий внесок – аналіз характеристик ВІД, рекомендації).

17. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Жуков Л.О. Технічна реалізація та експериментальні дослідження вентильно-індукторного двигуна. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. Вип. 2/2013 (22). Ч. 2. С. 158-161 (Особистий внесок – розробка дослідного зразка і дослідження основних властивостей ВІД, рекомендації).

18. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Попович О.М., Бібік О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Романенко В.І. Розвиток теорії, вдосконалення математичних моделей, дослідження електричних машин і електромеханічних систем. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 38. С. 73-81 (Особистий внесок – аналіз експлуатаційних режимів та формування задач з підвищення енергоефективності насосних установок).

19. Бібік О.В., Гребеніков В.В., Приймак М.В., Гамалія Р. Проектування вентильно-реактивного двигуна зі зниженими пульсаціями електромагнітного моменту. *Технічна електродинаміка*. 2014. С. 117-119 (Особистий внесок –

розроблення підходу оптимального проектування ВІД з забезпеченням мінімальних пульсацій електромагнітного моменту).

20. Бібік О.В. Аналіз і основні тенденції розвитку електромеханічних перетворювачів енергії для систем з періодичним навантаженням. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. № 43. С. 37-43.

21. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О. А., Шихненко М. О. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С–скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2016. № 11 (1183). С. 64-69. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії (Особистий внесок – формування завдання чисельних і експериментальних досліджень, розроблення математичної моделі ВІД, аналіз результатів, висновки).

22. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 38-45 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі насосного обладнання багатоповерхового будинку, чисельні дослідження, розробка заходів з підвищення енергоефективності АД у складі ЕМС).

23. Бібік О.В., Гребеніков В.В. Аналіз впливу магнітних систем на характеристики вентильно-реактивних та синхронно-реактивних двигунів. *Гідроенергетика України*. 2016. № 3. С. 47-50 (Особистий внесок – постановка чисельного експерименту, дослідження впливу геометрії магнітних систем ВІД на їх характеристики, рекомендації).

24. Бібік О.В. Вентильно-індукторний привод насосної установки багатоповерхового будинку. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. № 45. С. 38-45.

25. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Клименко В.Г., Шихненко М.О. Оцінка можливості використання вентильно-реактивного двигуна у складі верстат-гойдалки. *Вісник НТУ «ХПІ». машини та*. 2017. № 1(1223). С. 97-100. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії (Особистий внесок –

розроблення математичної моделі ВІД верстат-гойдалки, дослідження режимів за зміни періодичного навантаження, рекомендації).

26. Попович О.М., Бібік О.В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2018. № (5). С. 79-82. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії (Особистий внесок – рекомендації по підвищенню енергоефективності АД у складі моноблочного насоса).

27. Бібік О.В. Розроблення вентильно-індукторних двигунів на основі методики пропорційного перерахунку. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. № 52. С. 33 – 39.

28. Бібік О.В. Обґрунтування підходів до проектування асинхронних двигунів із змінним навантаженням. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. № 1. С. 94-98.

29. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В. Джура О.В., Бібік О.В., Гамалія Р.В., Шихненко М.О. Електромеханічні перетворювачі енергії для систем електрогенерації та електропривода. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. № 54. С. 63-74 (Особистий внесок – розроблення загальної математичної моделі ВІД з врахуванням особливостей складових системи та їх взаємного впливу і засобів по підвищенню енергоефективності та надійності електромеханічних комплексів зі змінним навантаженням).

30. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.4, pp. 12-16 (Особистий внесок – постановка задачі, розроблення принципів керування частотою обертання ВІД з врахуванням змінного навантаження одноциліндрових поршневих компресорів, рекомендації).

31. Bibik O.V., Popovych O.M., Shurub Y.V., Golovan I.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 33-39 (Особистий внесок – постановка задачі, розроблення математичної моделі і методу дослідження АД з перетворювачами частоти і періодичним навантаженням, обґрунтування розробки заходів по підвищенню їх ефективності у складі ГПК).

32. Бібік О.В., Зайченко С.В., Клименко В.Г., Лафа Є.Ф. Верстат-гойдалка з регульованим приводом: пат. 98824 Україна: МПК 04В 47/02. № у 2014 12240; заявл. 13.11.2014; опубл. 12.05.2016, Бюл. № 9 (Особистий внесок – розробка верстат-гойдалки з регульованим вентиляльно-індукторним двигуном).

33. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О., Клименко В.Г. Спосіб стабілізації частоти обертання вентиляльно-індукторного двигуна: пат. 107247 Україна: МПК Н02Р 6/08, Н02Р 8/12, Н02К 19/06. № у 2015 12131; заявл. 07.12.2015; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10 (Особистий внесок – розробка способу стабілізації частоти обертання ротора ВІД, що полягає у формуванні струмів у фазній обмотці при здійсненні комутації шляхом подачі напруги на фазу двигуна із затримкою, величина якої прямо пропорційна до змін частоти обертання ротора, викликаних зміною моменту опору двигуна).

34. Библик Е.В., Попович А.Н. Анализ и учет квазистатики при математическом моделировании асинхронных двигателей с переменным характером нагрузки: *матеріали міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах»*, Севастополь, 20-24 вересня 2004 р. Севастополь: СевНТУ, 2004. С. 14.

35. Библик Е.В., Попович А.Н., Головань И.В. Исследования квазистатических режимов асинхронного двигателя при пульсирующей и периодической нагрузках. *Технічна електродинаміка*. 2006. Ч. 2. С. 99-102. Темат. випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». *За матеріалами міжн. наук.-техн. конф. «Силовая електроніка та енергоефективність»*, Алушта, 2006 р.

36. Мазуренко Л.І., Бібік О.В. Стан і перспективи розвитку вентиляльно-індукторних машин: *матеріали міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми енергозбереження в агропромисловій та природоохоронній сферах»*, Київ, 14-15 жовтня 2010 р. Київ: НУБіП України, 2010. Вип. 153. С. 19-21.

37. Библик Е.В. Анализ режимов вентиляльно-индукторного двигателя поршневого компрессора: *матеріали XII наук.-техн. конф. «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних*

системах». Севастополь, 23-27 вересня 2013 р. Севастополь: СевНТУ, 2013. С. 35-36.

38. Бібік О.В., Клименко В. Г., Поліщук В.О. Вентильно-індукторний двигун з системою керування для приводу верстат-гойдалок: *матеріали VII міжн. наук.-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина»*, Київ, 25-27 вересня 2015 р. Київ: НТТУ "КПІ", 2015. С. 63 – 64

ANNOTATION

Bibik O.V. The development of theory and measures of improve the energy efficiency of switched reluctance and induction motors with variable load. – Manuscript.

The thesis on receipt of scientific degree of doctor of engineering sciences on the specialty 05.09.01«Electrical machines and apparatus». – Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to increase of energy efficiency of switched reluctance and induction motors for systems with variable load. They are widely used in industry, utilities, household appliances. This problem for induction motors is traditionally solved by optimal designing under steady-state operation, choice flywheels, the use of high-slip induction motors with short-circuited rotors and adjustable IM's with frequency converters. An alternative to latter's is created by controlled switched reluctance motors (SRM), which differ in manufacturability, reliability, energy efficiency.

Operating modes of induction and switched reluctance motors with variable load are quasi-static. The presence of significant pulsations of the rotor speed, currents, and electromagnetic moments leads to deterioration of the energy performance of IM's and reduce their energy efficiency. Operating modes of switched reluctance motors and induction motors with frequency converters for the purpose of formation of their energy-efficient characteristics taking into account periodicity of loading are investigated insufficiently.

A review and analysis of existing approaches to the development of electromechanical energy converters for systems with variable loads, prospects for the development of electric machines, requirements for the development of competitive motors, taking into account the needs of pumping and compressor equipment has been made. The relevance of the direction of research has been proved, which consists in the further development of theoretical bases of creation of energy efficient switched reluctance and induction motors taking into account features of loading.

The actual important scientific and applied problem of development of the theory of induction and switched reluctance motors for variable load has been solved by

development of mathematical models, concepts of optimal designing and principles of motor speed control taking into account the load torque.

The general structure of mathematical model for research of quasi-static conditions of electromechanical energy converters as components of electromechanical systems with variable load is developed. It includes improved and developed dynamic mathematical models of induction and switched reluctance motors, load and algorithm for calculating integral indicators and analyzing the characteristics of quasi-static modes.

According to the offered algorithm integral values of currents, moments, rotor speed and their pulsations, losses, efficiency of motors are calculated on the repetition period of load. Comparison of the results of operating modes with periodic load is performed for a constant moment, which is equal to the average value of periodic load. This allowed to clarify nature of electromagnetic and electromechanical processes of variable load motors and increase the adequacy of mathematical modeling of motors in quasi-static modes.

The influence of load periodicity on the nature of changes in time dependences of rotor speed, currents, electromagnetic moments and their pulsations and efficiency of three-phase and single-phase induction motors were researched with the help of developed mathematical models. The expediency of calculation of IM's in quasi-static modes taking into account the repetition period of load is proved.

The complex design induction motors is effective with changing the load torque. The ratio for heavy quasi-static conditions k_{kp} is proposed for selection of such uncontrolled IMs for which this method of improving the energy efficiency gives an appreciable effect. The value of k_{kp} is calculated as a ratio of the mechanical T_{MK} to electromagnetic T_E time constants of IM and depends on the critical moment of inertia of electric drive; angular speed of the field in the air gap of IM; the critical slip and critical torque; number of pole pairs. The efficiency of quasi-static regimes depends on the ratio of these time constants.

The concept of optimal designing of motors with variable load has been further developed. It is based on the research of transient processes of motors with variable load and the formation of analytical dependences of efficiency in quasi-static modes on the

design parameters of motors. The proposed concept makes it possible to increase the efficiency of induction motors in quasi-static modes in comparison with their optimal design for static modes. The possibility of increasing the efficiency in quasi-static modes up to 8... 10% on the example of a three-phase six-pole motor with a power of 750 W with a pulsating load is substantiated. The first formed analytical dependences of efficiency on the length of the package and the number of effective conductors of the stator winding are used, when they vary within 10% from basic motor.

Mathematic model of frequency-controlled induction motor drive for piston compressors taking into account the varying load torque, nonlinear electromagnetic parameters, asymmetry and non-sinusoidality of processes have been developed. The region of critical reduction of uncontrolled and of frequency-controlled induction motors efficiency (more than 10%) for single-cylinder piston compressors are determined using the criterion of heavy quasi-static regimes. The criterion is used to determine the need for consideration of periodically varying load torque when developing the propositiones to improve the efficiency.

The theoretical bases of designing of switched reluctance motors have been further developed, which include the technique of proportional recalculation and optimal designing of motors. According to the technique of proportional recalculation SRM are developed for set power and rotor speed. It is based on the relationship of energy performance of basic and new machine, which is developed and geometrically similar to it.

The concept of optimal design of SRM bases on the using the dependences of the maximum and average electromagnetic moments and its pulsations on the inner diameter of the stator and the angular values of poles of the stator and rotor. It allows to increase efficiency of designing SRM and to receive its optimum variant with the set average electromagnetic moment with the minimum pulsations.

Mathematical models of switched reluctance motors have been developed. They take into account the mutual influence of the inductor machine, converter, control system, periodic load, using nonlinear dependences of the stator phase inductance on the current and the angle of rotation of the rotor and the algorithms for regulating the motor speed.

The expediency of taking into account the periodic load when calculating the relative pulsations of the rotor speed SRM its changes in operating modes is scientifically substantiated. This allows to increase the adequacy of mathematical modeling. For the first time it was established that for single-cylinder reciprocating compressors the discrepancy of the results of these calculations in comparison with the constant load is 10 ... 90% in the speed range 1: 6.

The experimental sample SRM with a switch with C-dump and oscillating energy return was developed in the dimensions of the motor 4AA56A4Y3 It allows to increase efficiency up to 7% in comparison with the induction motor, provides a reliable start at decrease in supply voltage and range of regulation of speed of rotation 1: 5.

The adequacy of mathematical modeling of SRM is confirmed by comparing the results of numerical and experimental studies. The differences between the values of phase currents and efficiency do not exceed 8.5% and 7% respectively.

The principles of speed control of switched reluctance motors with periodic load and its stabilization by changing the supply voltage and switching angles were developed, which allow to form energy-efficient operating modes. For the first time the principle of speed control of switched reluctance motors of single-cylinder reciprocating compressor at change of supply voltage and switching angles was developed that ensure maximum of efficiency values and necessary level of speed pulsations taking into account periodic load.

Mathematical models for complex research and definition of actions for increase of energy efficiency of the modes of electromechanical system of pump installation of a multystoried house are developed. MM takes into account its hydraulic supports and the required minimum pressure depending on the costs according to the daily schedule of water supply. The optimal modes of operation of the induction motors when adjusting the frequency and supply voltage taking into account the load are determined to ensure the maximum value of the coefficient of energy efficiency of this system. This allows to increase the energy efficiency of water supply systems up to 23% compared to unregulated IM's.

Recommendations have been developed:

- selection of uncontrolled IM's using the criterion for heavy quasi-static regimes. The criterion assesses the need to take into account periodically varying load torque when developing measures for improving efficiency, for example, piston compressor drives;

- determine the moments of inertia of motors of single and double-cylinder compressors, which provide the recommended level of rotation of the rotor speed in the operating range;

- complex design work should be carried out taking into account the changing range for speed control, loading degree, moment of inertia, the varying voltage and frequency, the structure of frequency-controlled system in order to develop the effective technical solutions for frequency-controlled induction motor drive for piston compressors. Without such complex designing the power efficiency can be decreased by more than 10%.

The algorithm for changing the supply voltage and switching angles of the SRM is proposed, which provides the maximum values of efficiency at change in the frequency of rotation in the range of 1:6.

The results of the research can be used for the creation of SRMs that operate in compressors and pumps in the areas of municipal and industrial use.

Keywords: switched reluctance motor, induction motor, periodic load, quasi-static regimes, designing, speed control, efficiency, ripples.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	27
ВСТУП	28
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМА СТВОРЕННЯ І ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ІЗ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	40
1.1 Електромеханічні системи із змінним навантаженням	40
1.1.1 Штангові нафтовидобувні установки	40
1.1.2 Поршневі й ротаційні компресори	43
1.1.3 Насосні агрегати	45
1.2 Особливості експлуатаційних режимів електромеханічних перетворювачів енергії із змінним навантаженням .	49
1.2.1 Квазісталі режими	49
1.2.2 Фактори, що впливають на ККД та пульсації частоти обертання ротора АД у квазісталіх режимах	52
1.2.3 Пускові режими	55
1.3 Класифікація, аналіз та перспективи створення ЕМПЕ для електромеханічних систем із змінним навантаженням	56
1.3.1 Аналіз технічних показників АД герметичних поршневих компресорів	56
1.3.2 Підходи до проектування АД з врахуванням умов експлуатації	61
1.3.3 Перспективи розвитку регульованих ЕМПЕ	63
1.4 Вентильно-індукторні двигуни: особливості, переваги, недоліки	66

1.4.1	Аналіз та вибір комутаторів ВІД	69
1.4.2	Діапазони керування частотою обертання ВІД	70
1.4.3	Особливості проектування і математичного моделювання ВІД	72
1.4.4	Розрахунок втрат і енергетичних показників ВІД	75
1.5	Вибір засобів математичного моделювання та методів аналізу ЕМПЕ	77
1.6	Методи розрахунку електромагнітного моменту ЕМПЕ	80
1.7	Формування задач дослідження та створення ВІД зі змінним навантаженням	82
1.8	Висновки до розділу 1	84
РОЗДІЛ 2	ВДОСКОНАЛЕННЯ І РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ІЗ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	86
2.1	Вимоги до математичних моделей АД для дослідження у складі ЕМС для умов змінного навантаження	86
2.2	Загальна структура математичної моделі для дослідження і аналізу квазісталих режимів ЕМПЕ зі змінним навантаженням	88
2.3	Математична модель оптимального проектування АД в квазісталих режимах	95
2.4	Математична модель АД, який навантажено вібратором	98
2.5	Математична модель електромеханічної системи насосної установки холодного водопостачання з АД	101
2.6	Математична модель частото-регульованого асинхронного приводу поршневого одноциліндрового компресору	107

2.7	Висновки до розділу 2	109
РОЗДІЛ 3	РОЗРОБЛЕННЯ МАГНІТНИХ СИСТЕМ І МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІД ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПРОЕКТУВАННЯ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	111
3.1	Вимоги до математичних моделей ВІД	111
3.2	Етапи та комплексна структура математичного моделювання ВІД, як складових систем із змінним навантаженням	112
3.3	Розроблення магнітних систем ВІД	118
3.3.1	Розроблення ВІД на основі серійних АД	118
3.3.2	Розроблення ВІД на основі методики пропорційного перерахунку	120
3.3.3	Розроблення магнітних систем ВІД із забезпеченням максимального середнього електромагнітного моменту	126
3.3.4	Методика розрахунку магнітних втрат в ВІД з врахуванням особливостей магнітної системи, режимів і зміни параметрів магнітного поля	130
3.4	Комплексні математичні моделі ВІД	133
3.4.1	Математична модель ВІД з використанням методики пропорційного перерахунку	133
3.4.2	Математичні моделі для комплексного дослідження робочих режимів ВІД з обраним типом комутатора і змінним навантаженням.	137
3.5	Висновки до розділу 3	142
РОЗДІЛ 4	ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	144
4.1	Критерій інтенсивних квазісталих режимів	144

4.2	Визначення періоду повторювання для розрахунку показників АД у квазісталих режимах	148
4.3	Підтвердження адекватності математичного моделювання квазісталих режимів АД поршневих компресорів	151
4.4	Дослідження впливу моменту інерції на показники квазісталих режимів трифазних шестиполюсних АД потужністю 750 Вт і 11 кВт одно- і двоциліндрових поршневих компресорів	153
4.5	Дослідження впливу моменту інерції та ємності робочого конденсатора на показники квазісталих режимів АКД поршневих компресорів	161
4.6	Дослідження квазісталих режимів дво полюсного асинхронного двигуна з двофазною синусною обмоткою статора електроприводу ГПК	169
4.7	Аналіз результатів розрахунків. Визначення шляхів підвищення ефективності АД в робочих режимах із змінним навантаженням	173
4.8	Дослідження впливу періодичного навантаження на ККД і пульсації електромагнітного моменту й кутової частоти ротора АД з частотним регулюванням за зміни ступеня його завантаження	178
4.9	Висновки до розділу	183
РОЗДІЛ 5	ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	186
5.1	Чисельні дослідження квазісталих режимів ВІД поршневих компресорів	186
5.2	Дослідження робочих режимів ВІД насосного обладнання	195

5.2.1	Регулювання частоти обертання ВІД за зміни напруги живлення і сталих кутах комутації	196
5.2.2	Регулювання частоти обертання ВІД за зміни кутів комутації і постійній напрузі живлення	200
5.3	Дослідження експериментального зразка ВІД з комутатором зі С-скиданням і коливальним поверненням енергії	200
5.3.1	Підтвердження адекватності математичної моделі ВІД	204
5.3.2	Стабілізація частоти обертання вентильно-індукторного двигуна за зміни напруги та кутів комутації	207
5.3.3	Дослідження впливу моменту інерції на ККД і пульсації частоти обертання ВІД одноциліндрових герметичних поршневих компресорів	209
5.3.4	Формування ефективних характеристик робочих режимів вентильно-індукторних двигунів герметичних поршневих компресорів	213
5.4	Висновки до розділу 5	218
РОЗДІЛ 6	ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ І ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ	220
6.1	Постановка задачі	220
6.2	Обґрунтування системи критеріїв для оцінки енергоефективності та надійності двигунів у складі систем зі змінним навантаженням	221
6.3	Розроблення концепції оптимального проектування АД з врахуванням особливостей навантаження	222
6.4	Оптимальне проектування АД з врахуванням змінного навантаження із забезпеченням максимального значення	224

	ККД у квазісталих режимах	
6.5	Визначення оптимальних значень ємності робочого конденсатора і моменту інерції привода ГПК у квазісталих режимах	230
6.6	Розроблення концепції оптимального проектування вентильно -індукторних двигунів з використанням методу планування експерименту	232
6.6.1	Етапи оптимального проектування вентильно-індукторних двигунів	234
6.6.2	Вибір варіанту ВІД із забезпеченням максимального середнього електромагнітного моменту	235
6.6.3	Визначення геометрії зубцевих зон статора і ротора ВІД, що забезпечує мінімальні пульсації електромагнітного моменту	241
6.7	Висновки до розділу 6	243
РОЗДІЛ 7	ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХА-НІЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ НА ОСНОВІ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ І АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	245
7.1	Розробка засобів і заходів покращення технічних характеристик насосного обладнання	245
7.1.1	Обґрунтування оптимальних режимів роботи АД за зміни частоти і напруги живлення у складі насосної установки багатоповерхового будинку	246
7.1.2	Підвищення енергоефективності системи водопостачання багатоповерхового будинку на основі використання вентильно-індукторного привода	252
7.1.3	Підвищення енергоефективності моноблочного насосу шляхом удосконалення обмотки конденсаторного асинхронного двигуна	255

7.2	Підвищення ефективності роботи свердловинного штангового насоса з верстат-гойдалкою на основі ВІД	257
7.2.1	Обґрунтування можливості регулювання частоти обертання ВІД і стабілізації частоти обертання кривошипа верстата-гойдалки	259
7.2.2	Дослідження впливу кутів комутації на частоту обертання вентильно-індукторного двигуна і кривошипа та ККД	260
7.2.3	Дослідження можливості стабілізації частоти обертання ВІД і кривошипа верстат-гойдалки	261
7.2.4	Розроблення вентильно-індукторного двигуна підвищеної ефективності для приводу свердловинного штангового насосного агрегату	263
7.3	Підвищення енергоефективності робочих режимів ВІД герметичних поршневих компресорів	267
7.4	Висновки до розділу 7	266
	ВИСНОВКИ	268
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	275
	ДОДАТКИ	300
Додаток А	Список публікацій здобувача та відомості про апробацію результатів роботи	300
Додаток Б	Акти впровадження	306
Додаток В	Система диференціальних рівнянь електричної рівноваги асинхронних двигунів	311
Додаток Г	Розрахунок залежностей напору і ККД насосу К 20/30 у функції подачі і частоти обертання	314
Додаток Д	Математична модель моноблочного насоса	317

Додаток Е	Розрахунок втрат в сталі з урахуванням особливостей конструкції ВІД, режимів і зміни параметрів магнітного поля	320
Додаток Ж	Технічні показники і критерії інтенсивних квазісталих режимів трифазних асинхронних двигунів у діапазоні потужностей 60 Вт – 11 кВт	327
Додаток И	Результати розрахунку показників квазісталих режимів АД з перетворювачем частоти у складі ГПК	329
Додаток К	Характеристики ВІД насосного обладнання потужністю 3 кВт за зміни напруги живлення і кутів комутації	330
Додаток Л	Експериментальні дослідження дослідного зразка ВІД	333
Додаток М	Результати розрахунків режимів роботи насосного агрегату системи водопостачання багатоповерхового будинку з нерегульованим і регульованим АД потужністю 3 кВт	344
Додаток Н	Результати розрахунків режимів роботи насосу БЦ1,1-20-У1 з двополюсним конденсаторним АД потужністю 550 Вт з різними типами обмоток	347

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АД – асинхронні двигуни;
ВІД – вентильно-індукторні двигуни;
ГК – герметичний компресор;
ЕМПЕ – електромеханотронні перетворювачі енергії;
ІМ – індукторна машина;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
МПЕ – метод планування експерименту;
МКЕ – метод кінцевих елементів;
ОАД – однофазний асинхронний двигун;
ОЦКП – ортогональний центрально-композиційний план;
ПФЕ – повний факторний експеримент;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Світові тенденції розвитку електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) спрямовано на розробку і впровадження програм економії енергоресурсів, підвищення енергоефективності технологічного обладнання. Значна частка електричної енергії споживається електромеханічними перетворювачами енергії, що працюють у складі електромеханічних систем (ЕМС) зі змінним навантаженням – компресорного та насосного обладнання, штангових нафтовидобувних установок, які широко використовуються в промисловості, комунальному господарстві, побутовій техніці.

Робочі режими ЕМПЕ у складі обладнання даного типу є квазісталими, що пов'язано з періодичною зміною моменту навантаження і, відповідно, частоти обертання ротора. Особливість режимів – наявність значних величин пульсацій частоти обертання ротора, струмів, електромагнітного моменту. Це негативно впливає як на енергоефективність, так і надійність двигунів та ЕМС у цілому. Виходячи з особливостей робочих режимів формують вимоги до приводів насосів та компресорних агрегатів. Найбільш жорсткі висуваються до герметичних поршневих компресорів: високі значення ККД і кратності максимальних моментів, надійний пуск при зниженні напруги і такі обмежуючі технологічні чинники, як рівень пульсацій частоти обертання і струмів. Це є важливим для створення конкурентно-спроможного енергоефективного електроприводу, в тому числі компресорного обладнання.

Найбільш розповсюдженими електромеханічними перетворювачами зі змінним навантаженням є асинхронні двигуни (АД), зазвичай, нерегульовані. При їх роботі реальний експлуатаційний ККД може значно зменшуватися. Це призводить до зниження енергоефективності обладнання, що необхідно враховувати при проектуванні.

Проблему підвищення енергетичної ефективності електромеханічних перетворювачів у складі механізмів з періодичним навантаженням традиційно розв'язують шляхом оптимального проектування АД у припущенні сталих режимів.

При цьому використовують маховики, АД з підвищеним ковзанням, регульовані асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором і перетворювачами частоти (ПЧ). Альтернативу АД з ПЧ створюють керовані вентильно-індукторні двигуни з реактивним ротором (ВІД). Вони відрізняються технологічністю, надійністю, за конструктивною простотою не поступаються АД та за енергоефективністю їх перевищують. Режим роботи вентильно-індукторних двигунів, навіть зі сталим навантаженням, є квазісталеними. Дослідженню регульованих ВІД і АД з перетворювачами частоти, підвищенню їх енергоефективності та формуванню відповідних робочих характеристик робочих режимів з врахуванням періодичного навантаження приділена недостатня увага.

Все це зумовлює проведення поглиблених досліджень квазісталених режимів асинхронних і вентильно-індукторних двигунів зі змінним навантаженням на основі розроблених математичних моделей та методів їх аналізу для розроблення заходів з підвищення енергоефективності із забезпеченням технічних і технологічних вимог. В зв'язку з цим *тема досліджень дисертаційної роботи є актуальною.*

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами. Дисертаційна робота виконувалась в Інституті електродинаміки НАН України відповідно до планів Держбюджетних НДР, затверджених Президією НАН України, та пов'язана з наступними НДР: «Розробка методів забезпечення енергоефективної експлуатації електричних машин з подовженим ресурсом» (шифр «Енергоресурс», за рішенням Вченої Ради ІЕД НАН України від 25.12.03 пр. №12), 2004 – 2006 рр., № ДР 0104U006434; «Розробка засобів підвищення енергоефективності різних типів електричних машин змінного струму та електромагнітних систем» (шифр «Енергоефективність», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 23.01.2007 р. Протокол № 1), 2007 – 2009 рр., № ДР 0210U000486; «Розробити математичні моделі для дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин з урахуванням особливостей живлення та динаміки навантаження» (шифр «Аселма», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 25.03.2004 р. Протокол №14), 2003 – 2007 рр., № ДР 0104U000267; «Розробити математичне забезпечення, методи і засоби створення спеціалізованих

електромеханічних систем на основі асинхронних машин та формування енергоефективних режимів їх роботи» (шифр «Аселма-2», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 04.12.2007 р. Протокол №16), 2008 – 2012 рр., № ДР 0108U000055; «Розвиток теорії, розробка математичних моделей і програмного забезпечення, комплексне дослідження і проектування енерго та ресурсоефективних асинхронних машин для систем з напівпровідниковими перетворювачами», (шифр «Аселма-3», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 25.09.2012 р. Протокол №14), 2013 – 2017 рр., № ДР 0112U008203; «Розробка ефективних технічних рішень вузлів електроенергетичного обладнання» (шифр «Об'єкт», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 06.10.2009 р. Протокол №13), 2010-2012 рр., № ДР 0109U006759; «Розробка засобів покращення технічних характеристик електроенергетичного обладнання на основі оптимізації електромеханічних, електромагнітних і теплових процесів», (шифр «Об'єкт-2», Постанова Бюро ВФТПЕ НАН України від 25.09.2012 р. Протокол № 14), № ДР 0112U008207, 2013-2015рр., «Провести дослідження та розробити технічні рішення для підвищення надійності електромеханічного обладнання електричних станцій» (шифр «Агрегат», Постанов Бюро ВФТПЕ НАН України від 07.07.2015 р. Протокол № 11), 2016 –2018 рр., № ДР 0115U004399; за темою «Розробка методів та засобів забезпечення енергоефективності електромеханотронних перетворювачів енергії» (шифр «Енергозбереження»), 2006-2008 рр. на підставі розпорядження Президії НАНУ від 20.06. 2006 р. (Договір №685-2006, від 27.06.2006 р.), 28 03. 2007 р. (Договір №686-2007 від 05.04.2007 р.), від 10.04.2008 р. №208 (Договір №687-2008 від 14.04.2008 р.), № ДР 0107U000071

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розроблення математичних моделей, концепцій оптимального проектування, принципів керування та засобів для підвищення енергоефективності вентильно-індукторних і асинхронних двигунів зі змінним навантаженням та електромеханічних систем на їх основі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– проаналізувати на основі першоджерел особливості робочих режимів, вимоги і підходи щодо створення електромеханічних перетворювачів енергії для

систем зі змінним навантаженням, визначити перспективи їх розвитку та сформувати задачі щодо розроблення асинхронних і вентильно-індукторних двигунів підвищеної енергоефективності для даних умов експлуатації;

- розробити загальні принципи для дослідження і аналізу квазісталих режимів електромеханічних перетворювачів енергії зі змінним навантаженням;

- удосконалити і розробити математичні моделі нерегульованих асинхронних двигунів для дослідження квазісталих режимів і оптимального їх проектування з врахуванням характеру навантаження;

- розробити математичні моделі для комплексного дослідження регульованих АД з перетворювачами частоти і змінним навантаженням;

- розробити математичні моделі ВІД з врахуванням типу комутатора, характеру навантаження та алгоритмів регулювання частоти обертання із забезпеченням їх енергоефективної роботи у складі ЕМС зі змінним навантаженням;

- підтвердити адекватність розроблених математичних моделей;

- дослідити режими АД і ВІД з різними типами навантажень та визначити розбіжності при розрахунках, коли квазісталі режими замінюються сталими;

- розвинути концепцію оптимального проектування асинхронних двигунів з врахуванням квазісталих режимів за умови змінного моменту опору з використанням аналітичних залежностей ККД від їх конструктивних параметрів;

- розвинути теоретичні засади оптимального проектування вентильно-індукторних двигунів з забезпеченням технічних і технологічних вимог;

- розвинути принципи керування частотою обертання вентильно-індукторними двигунами та її стабілізації шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації з врахуванням періодичного навантаження;

- розробити заходи щодо підвищення енергоефективності асинхронних двигунів, що працюють у складі систем зі змінним навантаженням, та електромеханічних систем у цілому;

- науково обґрунтувати методологію розроблення заходів по підвищенню ККД і зниженню пульсацій частоти обертання двигунів в робочих режимах з періодичним навантаженням;

– розробити рекомендації щодо використання нерегульованого і частотно-регульованого асинхронних приводів та вентиляно-індукторних двигунів для різних типів навантаження.

Об'єкт дослідження – квазісталі режими вентиляно-індукторних і асинхронних двигунів зі змінним навантаженням.

Предмет дослідження – математичні моделі, характеристики, принципи керування та оптимальне проектування вентиляно-індукторних і асинхронних двигунів зі змінним навантаженням.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на чисельних методах розв'язку систем диференційних рівнянь, методах апроксимації одно- та двовимірних залежностей, методі скінчених елементів на основі ліцензованих програмних комплексів COMSOL, LCAT і MATLAB для розрахунку електромагнітного поля у двовірній постановці задачі, методі просторових комплексів узагальненої теорії АД та матричних перетворень, методах планування експерименту і оптимізації для задач проектного синтезу.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено динамічні математичні моделі для дослідження квазісталіх режимів трифазних і двофазних з фазозсуваючими елементами у колі статора асинхронних двигунів шляхом врахування характеру навантаження, інтегральних значень струмів, моментів, частоти обертання та їх пульсацій, втрат і енергетичних показників на періоді повторення, які більш адекватно відображають реальні робочі режими, ніж відомі моделі, і дозволяють проводити їх аналіз за зміни моментів опору і параметрів двигунів.

2. Вперше розроблено математичні моделі для комплексного дослідження частотно-регульованих асинхронних двигунів з врахуванням періодичного навантаження, нелінійності електромагнітних параметрів, несиметрії та несинусоїдності процесів, що дозволяє проводити аналіз робочих режимів поршневих компресорів за зміни частоти і напруги живлення та ступеня їх завантаження.

3. Вперше виявлено з використанням критерію інтенсивних квазісталих режимів, який запропоновано для оцінки протікання електромагнітних і електромеханічних процесів та ефективності цих режимів, області критичного зниження ККД (більш ніж на 10%) нерегульованих і частото-регульованих асинхронних двигунів поршневих одноциліндрових компресорів, що науково обґрунтовує необхідність розробки заходів з підвищення енергоефективності.

4. Розвинуто концепцію оптимального проектування асинхронних двигунів з врахуванням перехідних процесів за умови змінного навантаження, яка базується на отриманих вперше аналітичних залежностях коефіцієнта корисної дії у квазісталих режимах від конструктивних параметрів та дозволяє підвищити ККД до 10 % за зміни довжини пакета статора і числа ефективних провідників обмотки у пазу статора АД у порівнянні з оптимальним проектуванням у сталих режимах.

5. Розроблено математичні моделі вентиляно-індукторних двигунів, в яких враховується взаємний вплив індукторної машини, комутатора, системи керування, періодичного характеру навантаження, з використанням нелінійних залежностей індуктивності фази статора від струму та кута повороту ротора та розроблених алгоритмів регулювання частоти обертання ВІД, що дозволяють проводити уточнений аналіз динамічних режимів та формувати ефективні робочі характеристики двигунів за зміни напруги живлення і кутів комутації та навантаження.

6. Розвинуто концепцію проектування ВІД, яка базується на:

- розробленій методиці пропорційного перерахунку з використанням зв'язку енергетичних показників машин базової та нової, яка розробляється і геометрично їй подібна, з їх лінійними розмірами, числом витків і активним опором обмотки, для визначення конструктивних параметрів нової машини заданих потужності і частоти обертання;

- вперше отриманих аналітичних залежностях максимальних і середніх значень статичного електромагнітного моменту двигуна та його пульсацій від діаметра розточення статора та кутових величин полюсів статора й ротора, що дозволяє підвищити ефективність проектування ВІД та зменшити час вибору його

оптимального варіанту з забезпеченням мінімальних пульсацій електромагнітного моменту.

7. Розвинуті принципи керування частотою обертання вентиляно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням та її стабілізації шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації, що дозволяє формувати енергоефективні робочі режими. Вперше розроблено принцип регулювання частоти обертання ВІД одноциліндрових поршневих компресорів за зміни напруги живлення і кутів комутації із забезпеченням максимальних значень ККД і необхідного регламентованого рівня її пульсацій у робочому діапазоні з врахуванням періодичного навантаження.

8. Науково обгрунтована доцільність врахування періодичного навантаження при розрахунках відносних пульсацій частоти обертання ротора ВІД за її зміни у квазісталих режимах. Вперше встановлено, що для ВІД герметичних поршневих компресорів: розбіжність результатів розрахунку з періодичним і постійним навантаженням (середнє значення періодичного і постійного навантаження однакові) знаходиться у межах 10 ... 90 % для діапазону частоти обертання 1:6; коефіцієнт корисної дії в робочому режимі з номінальним навантаженням більше на 4...6% в порівнянні з асинхронним однофазним двигуном.

9. Науково обгрунтовано оптимальні режими роботи АД насосної установки багатоповерхового будинку при регулюванні частоти і напруги живлення з врахуванням особливостей навантаження шляхом чисельних досліджень за допомогою розробленої математичної моделі з використанням критерію комплексної оцінки енергоефективності цієї системи, який враховує її гідравлічні опори і необхідний мінімальний напір в залежності від витрат згідно добового графіку водопостачання, що дозволяє підвищити енергоефективність ЕМС до 23 % в порівнянні з нерегульованим АД.

Практичне значення отриманих результатів:

– розроблено програмні засоби та заходи щодо удосконалення асинхронних двигунів шляхом їх оптимального проектування з врахуванням змінного навантаження та резерву підвищення ККД у квазісталих режимах;

- розроблено методичні і програмні засоби покращення характеристик робочих режимів АД при регулюванні частоти і напруги живлення з врахуванням характеру навантаження герметичних поршневих компресорів та насосної установки багатоповерхового будинку та заходи з підвищення енергоефективності;
- розроблено у габаритах двигуна 4AA56A4 дослідний зразок ВІД з комутатором з С-скиданням і коливальним поверненням енергії, який дозволяє підвищити ККД на 1...7% у порівнянні з асинхронним двигуном, забезпечує надійний плавний пуск при зниженні напруги та діапазон регулювання частоти обертання 1:5 (3000 об/хв. : 600 об/хв.). Такий ВІД призначений для використання в комунальному секторі, побутовій техніці тощо та презентований як новітня розробка на виставці-форумі інновацій і науково-технічних розробок НАН України (21-24 листопада 2017 р. і 2018 р.);
- розроблено програмні засоби та заходи щодо керування ВІД одно - і двоциліндрових поршневих компресорів, що забезпечують при зміні напруги живлення і кутів комутації максимальні значення ККД та необхідний рівень пульсації частоти обертання (20%) в діапазоні 1:6;
- розроблено ВІД потужністю 54 кВт підвищеної ефективності для приводу свердловинного штангового насосного агрегату, значення ККД якого 94% і загальна маса у 2 рази менше, ніж у двошвидкісного асинхронного двигуна 4A250S4/2Y3; запропоновано спосіб керування ВІД верстат-гойдалок з врахуванням періодичного навантаження та стабілізації частоти обертання кривошипа на рівні 15 об/хв згідно технічних вимог;
- запропоновано нові технічні рішення: енергоефективний вентильно-індукторний електропривод верстата-гойдалки (Пат. на корисну модель 98824, Україна); спосіб стабілізації частоти обертання вентильно-індукторного двигуна (Пат. на корисну модель № 107247, Україна.);
- розроблено рекомендації щодо селекції і вдосконалення нерегульованих АД для підвищення енергоефективності в робочих режимах у складі систем зі змінним навантаженням, використання нерегульованих трифазних АД і регульованих АД з перетворювачами частоти і ВІД для насосів та поршневих одно- і двоциліндрових

компресорів, вибору мінімальних значень моментів інерції приводу одноциліндрових компресорів, що забезпечують регламентований рівень пульсацій частоти обертання ротора ВІД і АД у робочих діапазонах.

Результати роботи використано у вигляді:

- рекомендацій щодо розроблення енергоефективних приводів з різними видами змінних навантажень, у тому числі поршневих компресорів холодильних машин в Українському науково-дослідному інституті електропобутових машин (УкрНДІЕМ) "ВЕСТА" (м. Київ). В цих рекомендаціях враховані результати розрахунково-теоретичних досліджень робочих режимів двигуна AIB71A2Ф2 зі змінним навантаженням шляхом їх порівняння з експериментальними даними у складі поршневих компресорів ВС 400, ВС 800;

- рекомендацій щодо розроблення нового енергоефективного приводу верстатів-гойдалок з ВІД на ПрАТ "ПВІ ЗІТ Нафтогазбудізоляція" (м. Київ);

- підходів до проектування, математичних моделей і методик дослідження режимів роботи ВІД і АД та їх програмних реалізацій при розробці енергоефективних і надійних приводів побутової техніки для курсового і дипломного проектування в Київському національному інституті технології та дизайну (м. Київ);

- математичних моделей і їх програмних реалізацій при виконанні студентами бакалаврських та магістерських робіт, присвячених дослідженню і проектуванню асинхронних двигунів підвищеної ефективності для систем насосного і компресорного обладнання в Національному технічному університеті України "КПІ" ім. Ігоря Сікорського (м. Київ).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові та результати, що виносяться на захист отримані автором особисто на основі самостійних досліджень, узагальнень і висновків. У дисертації не використовувались ідеї і розробки, що належать співавторам, з якими опубліковані наукові праці.

Публікації [5, 8, 10, 14, 20, 24, 27, 28, 37] написані здобувачем одноосібно.

У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному: [1, 2] – розроблення математичних моделей АД, який навантажено

вібратором, та АД з конденсаторами у колі статора і мережі для оптимального проектування у складі ЕМС відповідно; [3] – аналіз існуючих методів та обґрунтування способу розрахунку коефіцієнту потужності при оптимізації ЕМС для перехідних і квазісталих режимах; [4] – чисельні дослідження, обґрунтування вибору періоду повторювання АД у квазісталих режимах; [6, 7, 34] – дослідження і обґрунтування доцільності оптимального проектування АД з урахуванням квазісталих режимів; [9, 11] – розроблення математичної моделі і підходу для оптимального проектування АД з урахуванням особливостей навантаження; [12] – розроблення засобів математичного моделювання і дослідження ВІД зі змінним навантаженням; [13] – дослідження режимів роботи конденсаторних АД та формування задач створення ВІД для ЕМС з періодичним навантаженням; [15, 35, 37] – дослідження і аналіз режимів ВІД і АД зі змінним навантаженням; [16, 17] – розробка дослідного зразка ВІД, дослідження і аналіз характеристик, розробка рекомендацій; [18] – аналіз способів підвищення енергоефективності приводів насосних установок; [19] – розроблення підходу оптимального проектування ВІД з забезпеченням мінімальних пульсацій електромагнітного моменту; [21] – постановка завдання чисельних і експериментальних досліджень, розроблення математичної моделі ВІД, аналіз результатів, висновки; [22] – розроблення математичної моделі насосного обладнання багатоповерхового будинку, чисельні дослідження, розробка заходів з підвищення енергоефективності АД у складі ЕМС; [23] – постановка чисельного експерименту, дослідження впливу геометрії магнітних систем ВІД на їх характеристики, рекомендацій; [25] – розроблення математичної моделі ВІД верстат-гойдалки, дослідження режимів за зміни періодичного навантаження, рекомендації; [26] – рекомендації по підвищенню енергоефективності АД у складі моноблочного насоса; [29] – розроблення загальної математичної моделі ВІД з врахуванням особливостей складових системи та їх взаємного впливу і засобів по підвищенню енергоефективності та надійності електромеханічних комплексів зі змінним навантаженням; [30] – постановка задачі, розроблення принципів керування частотою обертання ВІД з врахуванням змінного навантаження одноциліндрових поршневих компресорів, рекомендації; [31] –

постановка задачі, розроблення математичної моделі і методу дослідження АД з перетворювачами частоти і періодичним навантаженням, обґрунтування розробки заходів по підвищенню їх ефективності у складі ГПК; [32, 38] – розробка верстат-гойдалки з регульованим ВІД; [33] – запропоновано спосіб стабілізації частоти обертання ротора ВІД, що полягає у формуванні струмів у фазній обмотці при здійсненні комутації шляхом подачі напруги на фазу двигуна із затримкою, величина якої прямо пропорційна до змін частоти обертання ротора, викликаних зміною моменту опору двигуна; [36] – аналіз перспектив розвитку вентильно-індукторних машин.

Наукові роботи опубліковані у співавторстві з Мазуренко Л.І., Поповичем О.М., Гребеніковим В.В. Співавторами наукових праць є науковий керівник та науковці, спільно з якими проведені дослідження. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить фактичний матеріал і основний творчий доробок.

Співавторами наукових праць дисертанта захищені такі дисертації: Попович О.М. «Математические модели, параметры и характеристики асинхронных двигателей электромехатронных систем», 2015, 373 с.

Апробація результатів дисертації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено та обговорено на міжнародних науково-технічних конференціях: «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах» (Севастополь, 2004 р., 2007 р., 2013 р.), «Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації» (Кременчук, 2004 р.), «Проблеми енергозбереження в електротехнічних системах» (Кременчук, 2001 р., 2002 р., 2010 р., 2013 р.), «Силовая електроніка і енергоефективність» (Алушта, 2006 р.) «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (Алушта, 2012 р.), «Проблеми енергозбереження в агропромисловій та природоохоронній сферах» (Київ, 2010 р.), «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2015 р.); а також на міжнародних симпозіумах: «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. SIEMA'2006» (Харків, 2006 р.), «IEPS-2014» (Київ, 2014 р.); «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки SIEMA' 2016» (Харків, 2016

р., 2017 р.). Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Вченій раді Інституту електродинаміки НАН України (21 липня 2017 р.).

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота викладена на 347 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 12 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 270 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 43 таблицями, 98 рисунками. Список використаних джерел містить 256 найменування, з них 215 кирилицею та 41 латиницею.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМА СТВОРЕННЯ І ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ІЗ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

1.1 Електромеханічні системи із змінним навантаженням

Значна частка всієї вироблюваної у світі електричної енергії у цей час споживається електроприводами, що працюють у складі електромеханічних систем із змінним навантаженням (компресорне та насосне обладнання, штангові нафтовидобувні установки), які знайшли застосування в промисловості, комунальному господарстві, побутовій техніці, тощо. Тому обрано для дослідження електроприводи поршневих і ротаційних компресорів, насосів, верстат-гойдалок. При цьому змінним навантаженням необхідно вважати періодичне, циклічне, пульсуюче або нелінійне навантаження.

Забезпечення ефективного використання електричної енергії електромеханічним обладнанням можливо завдяки ефективному її перетворенню. Питання економії електроенергії загострюється у зв'язку зі значним підвищенням світових цін на енергоносії. Тому, проблема створення електромеханічних перетворювачів енергії підвищеної енергоефективності для умов змінного навантаження шляхом вдосконалення традиційних асинхронних та створення регульованих електромеханічних перетворювачів енергії, наприклад вентильно-індукторних двигунів тощо, із забезпеченням енергоефективних та надійних робочих режимів, є актуальною.

Розглянемо особливості електромеханічних систем на основі асинхронних і вентильно-індукторних двигунів зі змінним навантаженням, визначимо вимоги щодо технічних характеристик, проведемо аналіз їх технічних рішень та окреслимо основні задачі досліджень.

1.1.1 Штангові нафтовидобувні установки.

Значна частка добичі нафти здійснюється за допомогою штангових нафтовидобувних установок (ШНВУ) з використанням верстатів-гойдалок, якими обладнано 70 % свердловин України. Основними елементами глибинонасосної установки є глибинний насос, який складається з колони труб і колони штанг, верстат-гойдалка, електродвигун з редуктором та пуско-захисний пристрій [107]. Біля свердловини встановлюють верстат-гойдалку, який перетворює обертальний рух ротора електродвигуна у зворотно-поступальний рух зв'язаної з плунжером помпи колони штанг.

При ході головки балансира вгору електродвигун (ЕД) споживає з мережі велику кількість електроенергії, що витрачається на підйом штанг і рідини, а при ході вниз частина цієї енергії, а саме, енергія, витрачена на підйом штанг, вертається назад у мережу. Циркуляція енергії супроводжується втратами енергії як у самому електродвигуні, так і в живильній мережі, що приводить до значної перевитрати електроенергії. При цьому погіршуються енергетичні показники електроприводу. З метою вирівнювання навантаження електродвигунів протягом циклу й зменшення зусиль, які передаються через зубчасту передачу редуктора, роблять зрівноважування верстатів-гойдалок, сутність якого полягає в наступному. За допомогою спеціальних пристроїв забезпечується прикладання до перетворюючого механізму верстата-гойдалки сил для врівноваження, за допомогою яких значно вирівнюється крива зусиль. При цьому сили зменшуються на ділянці ходу штанг вгору й збільшуються (стають позитивними) на ділянці ходу вниз, стаючи приблизно рівними по величині зусиллям при ході нагору. Однак, навіть при повному врівноважуванні верстатів-гойдалок момент опору двигуна залишається періодичним зі змінним моментом інерції.

Для режиму роботи ЕД цього електроприводу характерні періодичні чергування перевантажень і недовантажень, що повторюються від 12 до 30 разів у хвилину і відповідають 5...15 ходам плунжера глибинного насоса. Таким чином, протягом одного циклу роботи установки (одного хитання) крива моменту опору двигуна має два максимуми й два мінімуми. Причому, максимуми відповідають середнім положенням балансира й можуть досягати величин, які близькі до

перекидаючого (максимального) моменту двигуна, а мінімуми - крайнім його положенням, що наближені до холостого ходу двигуна. На характер кривої зміни навантаження ЕМП впливають опір руху штанг у трубах, недозаповнення насоса тощо. Крім того, для моменту навантаження ЕД характерні проміжні пульсації, які мають загасаючий характер і обумовлені поздовжніми коливаннями штанг. У момент пуску амплітуда цих пульсацій може досягати 30% і більше від основного максимуму навантаження.

Особливість режимів роботи приводу глибинонасосної установки з верстат - гойдалкою – це циклічно-змінний характер навантаження, важкі умови пуску, довготривалі періоди роботи двигуна в режимах холостого ходу та недовантаження. Довготривалий період їх роботи в цих умовах призводять до зниження енергоефективності приводу і неоптимальному використанню енергоресурсів [34, 72, 110]. Тому вибір енергоефективних ЕМРЕ для даного обладнання є актуальним. Регулювання частоти обертання двигунів і, відповідно, частоти обертання кривошипа для даних об'єктів є, вкрай, важливим і необхідним.

В сучасних штангових нафтовидобувних насосних установках використовують в основному нерегульовані асинхронні трифазні електродвигуни потужністю від 1,5 до 55 кВт, яка в 1,5–2 рази більша, ніж номінальна потужність, чим забезпечується необхідна перевантажувальна здатність двигунів [110]. Енергетичні показники приводів даних об'єктів оцінюються цикловим ККД, який визначається за період одного циклу зміни навантаження верстата-гойдалки, і приймає значення у діапазоні 65%...88% для асинхронних двигунів.

Дані особливості експлуатації ШНВУ потребують використання регульованого приводу, наприклад, двошвидкісного асинхронного, який дозволяє досить довго працювати на нижчій або вищій частотах обертання двигуна та дискретно переходити за цикл роботи з одного (оптимального) режиму до другого. Перспективними для таких об'єктів є асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором з перетворювачами частоти [127], які забезпечують плавне регулювання частоти обертання. Альтернативу їм створюють регульовані синхронні вентильні двигуни (СД) з електромагнітним збудженням або збудженням

від постійних магнітів (СДПМ), а також вентиляно-індукторні двигуни, значення циклового ККД яких більше 90 % [72].

Математичному моделюванню і дослідженню динамічних режимів верстат-гойдалок з асинхронним електроприводом присвячено роботи [110, 126-128], з вентиляно-індукторним приводом – незначна їх кількість. В основному розглядаються вентиляно-індукторні двигуни з постійними магнітами [72].

Огляд публікацій показав, що питання покращення характеристик та формування робочих режимів електроприводу верстатів-гойдалок на основі ВІД потребують дослідження з метою обґрунтування їх використання для даних систем.

1.1.2 Поршневі й ротаційні компресори

У сучасній техніці великий клас представляють машини для подачі рідин і газів: насоси, компресори [72, 76]. Останні за принципом роботи діляться на поршневі й ротаційні, у тому числі й гвинтові.

Поршневі компресори (ПК) широко використовуються для холодильних агрегатів, найбільш – у побутових холодильниках (99%). Світовий обсяг сучасних герметичних поршневих компресорів (ГПК) становить більш 90 % від усього обсягу поршневих компресорів, причому більша частина ГПК має потужність до 0,5 кВт. Вони використовуються у побутових холодильниках, морозильних камерах, малих агрегатах для охолодження продукції торгових підприємств [76,188], мають моторесурс від 5 до 6 років та не підлягають ремонту.

Потужність на валу поршневих компресорів змінюється періодично залежно від кута повороту кривошипа [7, 197]. У поршневих компресорів одинарної дії подача здійснюється тільки при русі поршня вперед, при зворотному ході подача відсутня (одноциліндрові компресори). Механізми подвійної дії (двоциліндрові) здійснюють подачу при ході поршня в обидва боки.

У побутовому секторі застосовуються компресори із кривошипно-шатунними та кривошипно-кулісними механізмами. Перші з них мають зовнішню м'яку підвіску, колінчатий вал розташований горизонтально й приводиться до

обертального руху електродвигуном із частотою обертання 1500 об/хв. Компресори з кривошипно-кулісним механізмом мають вертикально розташований вал, що з'єднаний з вихідним валом ЕД із частотою обертання 3000 об/хв. Високошвидкісні компресори кривошипно-кулісного типу є більше сучасними, відрізняються меншими габаритами й масою, кращими показниками по теплоенергетичних характеристиках, низьким рівнем звуку й вібрацій.

Ротаційні компресори перспективні завдяки перевагам [76]: а) обертовий рух електродвигунів безпосередньо передається ексцентриковому валу (відсутня проміжна ланка, як це має місце в поршневих компресорах), що сприяє зменшенню втрат енергії й збільшенню ККД; б) можливість роботи при більшому числі обертів; в) більше врівноважені; г) мають менші розміри (габарити) і об'єм; д) відсутні всмоктувальні, а іноді й нагнітальні клапани, через що зменшуються втрати. Завдяки цим якостям ротаційні компресори в багатьох випадках витісняють поршневі.

Енергетична ефективність холодильного обладнання визначається коефіцієнтом корисної дії (ККД) або зворотною функцією – холодильним коефіцієнтом K_e (COP), які зв'язують кількісно охолодження, що забезпечується системою, зі споживанням за той же часовий інтервал електроенергії [73, 74]. Поліпшення енергетичної ефективності ГПК можливо при оптимальному співвідношенні високої холодопродуктивності й низького значення потужності, яка споживається системою. Дане обладнання вимагає електроприводу, який повинен забезпечити важкі умови пуску і високу енергоефективність робочих режимів водночас.

Вимоги до асинхронних двигунів *ГПК* наступні: надійний пуск при зниженні напруги мережі (до 170 В), необхідні кратності пускового і максимального моментів, високі значення ККД у робочих режимах, підвищена нагрівостійкість ізоляції обмотки двигуна (до 180°С); застосування електротехнічних сталей з питомими втратами не вище 2 Вт/кг.

Регулювання холодопродуктивності поршневих компресорів виконується на основі механічного або двопозиційного принципів, а також регулювання частоти

обертання ротора двигуна. Для малих холодильних агрегатів в основному використовується двопозиційне регулювання температури в холодильній камері, що здійснюється шляхом пуску – зупинки, зазвичай, АД. У цьому випадку компресор включається при температурі в холодильній камері, що досягає верхньої границі діапазону нечутливості терморегулятора, і відключається при досягненні температури, що відповідає його нижній границі. Такий режим характеризується істотними коливаннями температур та призводить до значних пускових струмів і, відповідно, до підвищеного зношування компресора.

Електроприводи для даного обладнання потребують регулювання частоти обертання двигунів у діапазоні 1:4...1:5, що дозволяє розширити технологічні можливості холодильних машин та істотно поліпшити їх техніко-економічні показники.

Найбільш розповсюдженим типом двигунів поршневих компресорів холодильних машин є асинхронні двигуни, зазвичай, нерегульовані, номінальні ККД яких знаходяться у діапазоні 72...77%, однак в робочих режимах – у межах 55...65% [226]. Це призводить до зниження енергоефективності обладнання. Ефективним для герметичних поршневих компресорів (потужністю до 500 Вт) є використання вентильних двигунів з постійними магнітами [220], (з ККД у межах 82...90%), а також вентильно-індукторних двигунів. Останні, на відміну від вентильних двигунів з постійними магнітами, виготовляються без обмотки ротора та мають ряд переваг (див. п. 1.4), наприклад, їх структура ідеально підходить до використання у складі герметичних поршневих компресорів (див. п.6.6.2).

1.1.3 Насосні агрегати

На сьогодні житлово-комунальне господарство залишається однією з найслабкіших ланок національної економіки. Четверта частина водопровідних очисних споруд і кожна п'ята насосна станція відпрацювали нормативний термін. Фактично 40 % насосних агрегатів потребує заміни.

Для централізованого водопостачання та водовідведення використовуються в основному насосні агрегати відцентрового типу на основі нерегульованих асинхронних двигунів потужністю від 1,5кВт до 250 кВт із синхронними частотами обертання 1000 об/хв, 1500 об/хв та 3000 об/хв.

Сучасна тенденція розвитку електроприводу, у тому числі для насосного обладнання житлово-комунального сектора тощо, полягає у активному використанні регульованого приводу замість традиційно нерегульованого, що дозволяє суттєво економити електроенергію. Режим водопостачання повинен відповідати потребам споживача, які змінюються протягом доби. В реальних умовах насосні установки працюють із змінною подачею і тиском. Споживання води протягом доби може змінюватись від максимального до мінімального (у діапазоні 10 ... 30%). Відсутність регулювання при знижених витратах призводить до росту тиску у системі, що викликає втрати енергії на створення надлишкового тиску, зносу обладнання і підвищення експлуатаційних витрат.

Досвід експлуатації частотно-регульованого АД широко відомий [38, 39, 106, 137, 142]. В той же час альтернативою асинхронним двигунам з перетворювачами частоти є конкурентно-спроможні вентиляно-індукторні двигуни, які мають ряд суттєві переваги: ефективність, технологічність, високу механічну міцність. Можливість і ефективність застосування вентиляно-індукторного електроприводу в складі насосних агрегатів для систем тепло - та водопостачання підтверджена результатами: порівняльних досліджень дросельованого насосного агрегату типу К95/50 на основі трифазних АД і ВІД (потужність 7,5 кВт, частота обертання 3000 об/хв.), який використовується на насосній станції підкачки [174]; натурних випробувань ВІД (потужність 15 кВт, номінальна частота обертання 3000 об/хв, діапазон регулювання частоти – від 500 до 3000 об/хв) для насоса ХВП типу К 90/3,5 в системі подачі холодної води на центральному тепловому пункті [181]; порівняльних експериментальних досліджень робочих режимів водяного насоса насосної станції з АД і ВІД [145]; випробувань шестифазного ВІД (потужність 3 кВт, діапазон частот обертання – 300...3000 об/хв) для насосного агрегату ЦН-319

системи охолодження, який встановлено на дизель-електричному підводному човні [133].

Крім того, при знижених витратах у випадку нерегульованого приводу суттєво знижується ККД насосу і двигуна. Покращити енергетичні характеристики дозволяє регулювання частоти обертання електродвигунів. При цьому суттєво знижується питома потужність, підвищується ККД, збільшується енергоефективність системи в цілому. У порівнянні зі зміною гідравлічних параметрів трубопроводу чи насоса, регульований привод дає можливість розширити діапазон регулювання продуктивності насосного агрегату за суттєвого зменшення споживання електричної енергії.

Із розширенням приватного сектору та збільшенням кількості житлових кварталів зростає зацікавленість у економному (за рахунок розв'язання пов'язаних проблем водо – і енергозбереження) водопостачанні квартир, що може бути досягнуто використанням індивідуального енерго – і ресурсозберігаючого насосного обладнання для окремих будинків. Сучасна тенденція розвитку електроприводу, у тому числі для об'єктів житлово-комунального господарства (ЖКГ), полягає у активному використанні регульованого приводу замість традиційно нерегульованого, що дозволяє покращити його енергетичні характеристики, розширити діапазон регулювання продуктивності насосного агрегату за суттєвого зменшення споживання електричної енергії, збільшити енергоефективність системи в цілому [108, 132, 181]. У дійсних умовах насосні установки працюють із змінною подачею (у діапазоні 70...90%) і тиском. Більшу частину доби внутрішні водопроводи житлових будинків працюють при тисках, які суттєво більші за номінальні. Тиск падає через збільшення споживання рідини у вечірній і ранковий періоди. Регулювання тиску при знижених витратах призводить до зменшення втрат енергії та рідини за рахунок зменшення витоків у негерметичних стиках, а також до зменшення зношення обладнання і експлуатаційних витрат. Тобто, доцільною є стабілізація напору в напірному трубопроводі [108, 181]. Для стабілізації необхідного тиску за умови нерівномірності споживання води протягом доби використовують інформацію з датчика тиску, який встановлюють на верхньому

поверсі багатоповерхового будинку. Для забезпечення енергоефективних режимів насосних комплексів на основі регульованих асинхронних двигунів визначають конкретні закони регулювання частоти обертання, які враховують характер навантаження та зміну технологічних параметрів [132].

Насосна установка багатоповерхового житлового будинку забезпечує підвищення напору у його трубопроводі для гарантованого підйому води на останній поверх у режимі максимальних витрат води. Відповідно до умов даного режиму здійснюється вибір насосу та приводного двигуна. При цьому, насос часто обирається за умови знаходження робочої точки за максимальної подачі біля правої межі його області економічної роботи, а також із відсутністю умов виникнення помпажу [204], які з'являються при перевищенні напору насосу за нульової подачі над величиною статичного напору водопровідної мережі. Двигун обирається за максимумом потужності на валу насоса. За нерегульованого електроприводу насосу зниження витрат води супроводжується зменшенням енергоефективності системи внаслідок перевищення напору насосу над необхідним напором мережі для даних витрат. Регулювання із стабілізацією величини напору [108] забезпечує підвищення енергоефективності НУ, проте не у максимальному об'ємі, оскільки не враховує особливості енергетичних характеристик усіх складових системи та їхній взаємний вплив.

Для забезпечення енергоефективних режимів насосних комплексів на основі регульованих АД визначають конкретні закони регулювання, які враховують характер навантаження та зміну технологічних параметрів [132]. Тому, актуальним є питання визначення оптимальних (за обґрунтованими критеріями) законів та алгоритмів керування електроприводами насосних агрегатів, за яких насоси ефективно працюють на мережу споживача, забезпечуючи потрібне значення продуктивності.

Задача отримання максимальної енергоефективності електромеханічних систем насосного обладнання багатоповерхових будинків потребує розроблення комплексних математичних моделей з урахуванням режимних особливостей та критерію комплексної оцінки енергоефективності цих систем, що дозволить

адекватно дослідити робочі режими та визначити оптимальні закони керування частотою обертання двигунами, які забезпечують діапазони зміни продуктивності згідно добового графіку водопостачання.

1.2 Особливості експлуатаційних режимів електромеханічних перетворювачів енергії із змінним навантаженням

Динамічні режими електромеханічних перетворювачів із змінним навантаженням поділяються на пускові і квазісталі. Останні оцінюють за відповідними показниками: енергетичними та пульсаціями струмів статора й ротора, моменту, частоти обертання ротора. Проведемо аналіз характеристик квазісталіх режимів і зробимо оцінку впливу факторів на їх показники.

1.2.1 Квазісталі режими

Для розглянутих об'єктів моменти навантаження електроприводів змінюються в часі і електродвигуни працюють з періодичним циклічним, пульсуючим або нелінійним характером навантаження, тобто по суті, у квазісталіх режимах. Для даних режимів характерні періодичні зміни миттєвих значень струмів статора i_s й ротора i_r , електромагнітного моменту M_e , частоти обертання ротора ω_r . Характеристиками квазісталіх режимів є:

- ступінь нерівномірності частоти обертання ротора $\delta\omega_r$:

$$\delta\omega_r = \frac{\omega_{r \max} - \omega_{r \min}}{\omega_{r \text{cp}}} \cdot 100\%; \quad (1.1)$$

- відносні пульсації електромагнітного моменту ΔM :

$$\Delta M = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\text{cp}}} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

- відносні пульсації струмів статора й ротора:

$$\delta i_q = \frac{i_{q_{\max}} - i_{q_{\min}}}{i_{q_{cp}}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

де q - показник приналежності до статора - s або ротора - r ; $\omega_{r_{\max}}$, $\omega_{r_{\min}}$ - відповідно максимальне й мінімальне миттєве значення кутової частоти обертання ротора за період зміни навантаження; $M_{\max}$, $M_{\min}$ - відповідно максимальні й мінімальні миттєві значення електромагнітного моменту; $i_{q_{\max}}$, $i_{q_{\min}}$ - відповідно максимальна й мінімальна амплітуди струмів статора й ротора; $\omega_{r_{cp}}$, M_{cp} , $i_{q_{cp}}$ - середні значення відповідно кутової частоти обертання ротора, електромагнітного моменту й струмів статора й ротора.

Припустимі значення ступеня нерівномірності частоти обертання ротора $\delta\omega_r$ залежать від типу привода й способу його з'єднання з компресором. Для поршневих компресорів загального типу рекомендується приймати $\delta\omega_r \leq 1,25\%$ (1/80), δi_q - до 66% [172, 197]. Для поршневих холодильних компресорів рекомендовані значення $\delta\omega_r$ знаходяться у діапазоні 1%...2%. Однак, припустимі значення $\delta\omega_r$, що рекомендовано для відкритих компресорів, неприйнятні для герметичних [172]. Для останніх $\delta\omega_r$ може бути у 5 ... 20 разів вище, ніж у відкритих машин. Ці дані потребують уточнення, що можливо завдяки математичному моделюванню динамічних режимів з урахуванням періодичного навантаження, та розробці рекомендацій щодо зменшення рівня пульсацій частоти обертання двигунів компресорів. Наявність коливань частоти обертання ротора, струмів й електромагнітного моменту приводять до збільшення втрат у міді статора і ротора електродвигунів і , як наслідок, до погіршення їх енергетичних характеристик. Наприклад, для однофазного асинхронного двигуна типу АГК-1-0,25 потужністю 250 Вт (з робочим і пусковим конденсаторами) ротаційного компресора пульсації частоти обертання становлять 37%, струму статора 7%, струму ротора 65%, механічної потужності 21%, що приводить до збільшення сумарних втрат двигуна на 15% при змінному навантаженні у порівнянні з постійним [134].

Для однофазного двополюсного конденсаторного двигуна потужністю 100 Вт (з робочим конденсатором $C_p = 3,9$ мкФ і позистором $R_n = 22$ Ом) виявлено у квазісталому режимі значні пульсації електромагнітного моменту ($\Delta M = 176$ %) та сумарні відносні втрати енергії в обмотках статора й ротора ($\Delta W_M = 106,5$ %), які розраховано як відношення різниці цих втрат на періоді навантаження до номінальних. Це викликано не тільки еліптичністю поля в повітряному проміжку, але й періодичністю моменту навантаження [90]. При цьому пульсації частоти обертання ротора незначні (до 2 %).

Пульсації електромагнітного моменту АД при періодичному навантаженні поршневого компресора залежать від ряду факторів: моменту опору, махового моменту компресора GD^2 , номінального ковзання, відношення середнього ковзання s_{cp} в усталеному режимі до критичного s_k [169]:

$$\Delta M = f\left(M_c, GD^2, s_n, \frac{s_{cp}}{s_k}\right). \quad (1.4)$$

Таким чином, їх значення можуть бути знижені не тільки за рахунок характеристик компресора, але й шляхом раціонального вибору механічної характеристики ЕМПЕ. Авторами [172] визначено також, що погіршення енергетичних показників через коливання обертаючого моменту менш значні в середнь-температурному режимі, де двигун недовантажений по потужності, чим у високотемпературному, у якому потужність значно більше.

Періодичне навантаження поршневих компресорів обумовлює пульсації струмів, електромагнітного моменту і частоти обертання ротора двигуна в робочих режимах. Засоби їх зниження відомі: збільшення номінального ковзання або сумарного моменту інерції електродвигуна і компресора. Останній реалізується за допомогою маховика, що є інерційною масою, яка діє на ротор двигуна. Недоліки першого способу – збільшення електричних втрат, другого – погіршення масо-габаритних показників.

Для розрахунку характеристик квазісталих режимів необхідно визначити період навантаження T_n [7, 134]. Для двополюсного трифазного двигуна

поршневого компресора T_n визначено як частоту навантаження, що відповідає числу обертів ротора за секунду n [7]:

$$T_n = \frac{1}{n} = \frac{1}{\frac{f_1}{p}(1-s_{cp})} = \frac{pT}{1-s_{cp}}, \quad (1.5)$$

де p - число пар полюсів; f_1 - основна частота мережі 50 Гц; T - період, що їй відповідає.

В результаті досліджень квазісталих режимів двигунів ротаційних компресорів [134] за період навантаження прийнятий період повторення амплітудних значень струмів, що дорівнює 0,35 с. У випадку ШНВУ період зміни моменту навантаження двигуна дорівнює періодові обертання кривошипа, який відповідає подвійному ходові плунжера глибинної помпи [126].

Таким чином, період розрахунку характеристик двигунів у квазісталих режимах потребує уточнення.

1.2.2 Фактори, що впливають на ККД та пульсації частоти обертання ротора АД у квазісталих режимах

Змінний характер навантаження впливає на рівень пульсацій струмів статора й ротора, приводить до збільшення електричних втрат, зниженню енергетичних показників. В значній мірі це суттєве для машин малої потужності, що мають великий активний опір обмотки статора, у яких у результаті пульсації струмів у квазісталих режимах зростають відповідно втрати в обмотках статора, а також ротора. В роботі [134] показано, що в умовах періодичного навантаження втрати в роторі АД ротаційного компресора зростають на 30,9%, у статорі – на 14,3%. У результаті чого ККД зменшується на 39% і $\cos\varphi$ – на 12,4% у порівнянні зі сталим навантаженням. *Тому, питання зниження електричних втрат і підвищення енергетичних показників у двигунах малої потужності ротаційних і поршневих компресорів є одним з важливих.*

Найбільш значущими факторами, що впливають на енергетичні показники АД, які працюють у складі ЕМС зі змінним навантаженням, є момент інерції приводу, активний опір обмотки ротора та коефіцієнт трансформації k_T обмотки статора. Останній має місце для однофазних асинхронних двигунів з двофазною обмоткою і визначається як:

$$k_T = \frac{w_{sb} \cdot k_{sb}}{w_{sa} \cdot k_{sa}}, \quad (1.6)$$

де w_{sa}, w_{sb} – ефективні витки і k_{sa}, k_{sb} – обмотувальні коефіцієнти відповідно головної й допоміжної обмоток статора.

У роботі [134] показано вплив коефіцієнта трансформації на енергетичні показники асинхронного конденсаторного двигуна із двофазною обмоткою у квазісталому режимі. Збільшення k_T на 13% приводить до збільшення втрат в обмотці статора на 1,9%, втрат у обмотці ротора – на 39,5%, зниженню ККД – на 3%, зниженню $\cos\varphi$ – на 3,5%.

Вибір опору обмотки ротора R_r має принципове значення завдяки його впливу щодо перерозподілу втрат у машині. Шляхом варіювання R_r асинхронного трифазного двигуна з фазним ротором в роботі [7] визначено його оптимальне значення, при якому втрати в обмотках статора і ротора мінімальні. Збільшення R_r у два рази дозволяє підвищити ККД цього двигуна на 2,7%. Показано, що діапазону оптимальних опорів обмотки ротора за мінімумом сумарних втрат в обмотках відповідає зона мінімуму ступеня нерівномірності частоти обертання двигуна.

Для однофазного конденсаторного двигуна з синусною обмоткою статора ротаційного компресора шляхом збільшення активного опору обмотки короткозамкненого ротора на 20,4% можна підвищити ККД лише до 2% (за рахунок зменшення втрат у статорі на 6,7% та втрат у роторі на 41%) [134].

Для асинхронного приводу, значення номінального моменту й синхронної кутової частоти обертання якого задано, змінну складову електромагнітного моменту (при даному моменті навантаження) можна обмежити за рахунок вибору

добутку моменту інерції на номінальне ковзання двигуна $J \cdot s_n$. Якщо можливість збільшення моменту інерції обмежена, доцільно збільшити номінальне ковзання двигуна, наприклад шляхом виконання короткозамкненого ротора з латунними стрижнями [7, 170, 172].

Ступінь нерівномірності обертання двигуна при даному змінному моменті M_c залежить від тієї синхронної частоти обертання, на яку він спроектований. Проектування ЕД на більше високу синхронну частоту ω_c дозволяє знизити $\delta\omega_r$ приблизно зворотно пропорційно квадрату частоти обертання. Це випливає з формули, що визначає зміну кінетичної енергії ротора ΔW_k :

$$\Delta W_k = J\omega_{cp}^2 \delta\omega_r. \quad (1.7)$$

Збільшення моменту інерції є нераціональним шляхом для убудованих двигунів герметичних поршневих компресорів. Це призводить до збільшення маси й габаритних розмірів не тільки двигунів, але холодильного агрегату у цілому.

При проектуванні електричних машин з періодичним або пульсуючим навантаженням рекомендовано збільшувати інерційні маси привода за рахунок установки додаткового маховика, що дозволяє знизити рівень пульсацій електромагнітного моменту і частоти обертання ротора двигунів, а також зношування машин та підвищити їх технічний ресурс [185].

Однак, для остаточного прийняття технічного рішення необхідні дослідження квазісталих режимів ЕМПЕ з врахуванням впливу навантаження і моменту інерції привода.

Таким чином, особливістю робочих режимів двигунів при змінному навантаженні є значні, в окремих випадках, пульсації струмів, електромагнітних моментів та частоти обертання ротора АД. Це призводить до погіршення надійності приводів та зниження енергетичних показників двигунів у робочих режимах від номінальних на 3...39 % і, як наслідок, зниженню енергоефективності обладнання, що необхідно враховувати при розробці ЕМПЕ.

1.2.3 Пускові режими

Одним з основних завдань проектування електроприводів з періодичним навантаженням і важкими умовами пуску (верстатів-гойдалок, поршневих компресорів тощо) є забезпечення високих кратностей пускових та максимальних моментів [107, 126, 134, 171, 182]. Необхідний пусковий момент верстатів-гойдалок в 5...6 разів перевищує обертаючий момент у сталому режимі. При цьому навантаження двигунів не перевищує 40%, у результаті чого двигуни працюють з низькими значеннями ККД і коефіцієнта потужності, що приводить до підвищеної витрати електроенергії й необхідності збільшувати поперечний перетин проводів живильних мереж і потужності трансформаторних підстанцій [72].

Для асинхронних двигунів ротаційних компресорів необхідні високі кратності пускового та максимального моментів для подолання моменту навантаження та його максимальних значень. Це підтверджено дослідженнями їх робочих режимів [134] та обґрунтовано кратності пускового K_n і максимального K_m моментів – відповідно не менш 4 і 4,5, а також пускового струму K_I – від 4 до 7,5.

З іншого боку, при зниженні напруги живлення (обертаючий момент АД знижується у квадратичній залежності від напруги) пусковий момент може бути недостатнім для надійного запуску. Це є причиною збільшення часу пуску, що приводить до збільшення втрат і перегріву двигуна. Не допускається тривале проходження пускового струму через робочий і пусковий конденсатори однофазних електродвигунів. Тому час пуску обмежений і для компресорів малої потужності знаходиться у діапазоні 3...5 с [171]. На пусковий момент (під навантаженням) істотно впливають як характер зміни протидіючого моменту компресора, так і положення поршня в момент пуску. Авторами роботи [171] досліджено та експериментальним шляхом обґрунтовано вибір початкових умов для розрахунку процесу пуску поршневих компресорів, встановлено найбільш імовірні положення поршня, що відповідають діапазонам кутів повороту ротора двигунів одно - і

двоциліндрових компресорів із забезпеченням практично нульових значень протидіючого моменту.

Забезпечення надійного пуску є важливою складовою підвищення надійної і ефективної роботи обладнання із періодичним навантаженням.

1.3 Класифікація, аналіз та перспективи створення ЕМРЕ для електромеханічних систем із змінним навантаженням

Сучасний електропривод, як було показано раніше, штангових нафтовидобувних насосних установок, промислових поршневих компресорів та систем централізованого водопостачання досі використовує нерегульовані асинхронні електродвигуни (з трифазними обмотками для напруги живлення 380В), для герметичних поршневих компресорів – однофазні асинхронні двигуни. Розглянемо тенденції створення електромеханічних перетворювачів енергії для обладнання, що працює в умовах змінного навантаження.

1.3.1 Аналіз технічних показників АД герметичних поршневих компресорів

Проведемо дослідження впливу схемних рішень обмоток статора асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором на їх технічні показники на прикладі приводу герметичних поршневих компресорів. У даному обладнанні використовуються АД з найбільш широким спектром схем обмоток статора в порівнянні з насосним обладнанням і ШНВУ.

Виробники сучасних компресорів постійно вдосконалюють їх конструкції відповідно до тенденцій і вимогами ринку [98, 136, 188, 222]. Одним з найважливіших напрямків є підвищення їх енергоефективності завдяки мінімізації енергоспоживання. Це, у свою чергу, вимагає удосконалення й оптимізації серійних АД [90, 158, 167], а також розробки енергоефективних електромеханічних перетворювачів енергії, частота обертання яких регулюється [82, 83].

У герметичних поршневих компресорах використовуються різні типи ЕМПЕ потужністю до 500 Вт (рис.1.1), для яких характерні: періодичне навантаження (потужність на валу змінюється періодично в широких межах: від холостого ходу до двократної і більше залежно від кута повороту кривошипа); особливості конструктивного виконання (це – вбудовані двигуни, що складаються зі статора й ротора (без вала) й не підлягають ремонту); важкі умови пуску та теплове навантаження.

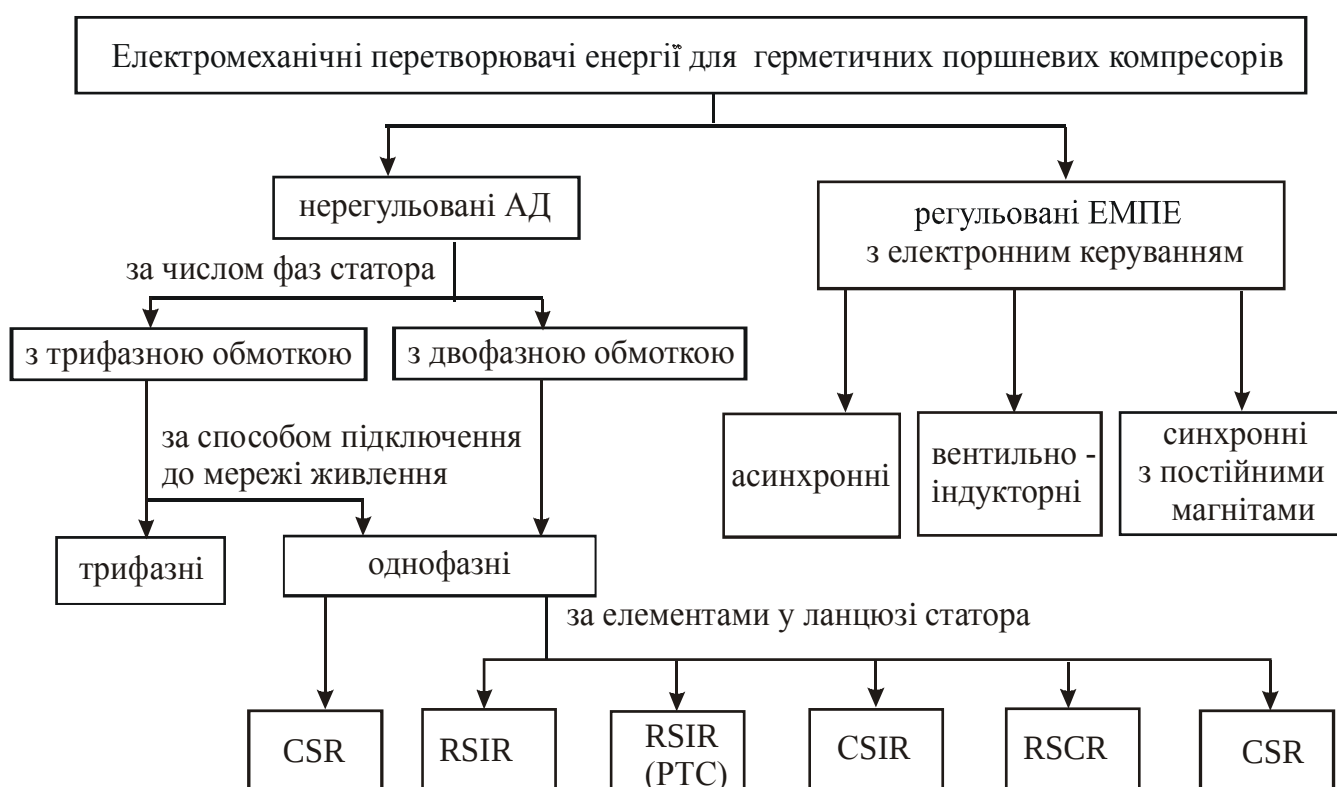


Рис. 1.1 Класифікація електромеханічних перетворювачів енергії з періодичним навантаженням

На покращення енергетичних і зменшення масо-габаритних показників нерегульованих АД впливають число полюсів, довжина пакета статора і ротора, тип обмотки і її параметри (коефіцієнт заповнення паза, число провідників обмотки тощо), типи елементів, які вмикаються у ланцюг статора (резистори, конденсатори, позистори) та їх номінальні значення, а також властивості електротехнічної сталі й електроізоляційних матеріалів, технологія виготовлення двигуна (отжиг листів

статора й ротора, методи заливки алюмінієм короткозамкненого ротора та складання пакетів, тощо).

Схеми включення асинхронних двигунів для ГПК поділяються за числом фаз m розподіленої обмотки статора (з трифазною обмоткою – $m=3$ та з двофазною – $m=2$), способом підключення до мережі живлення (трифазні, $U=380$ В і однофазні, $U=220$ В), типом фазозсуваючих елементів у ланцюзі статора. Останні представлено схемами: з пусковою обмоткою (біфілярна обмотка з підвищеним активним опором) та електромагнітним реле – схема RSIR; з пусковою обмоткою та позистором R_n (PTC) – схема RSIR (PTC); з пусковою обмоткою та пусковим конденсатором C_n – схема CSIR; конденсаторні двигуни з позисторним пуском, у допоміжну обмотку яких постійно включено робочий конденсатор C_p та позистор – схема RSCR; з робочим і пусковим конденсаторами – схема CSR.

Для порівняння й аналізу технічних і масо-габаритних показників розглянемо АД для ГПК, які представлені в табл.1.1: серійні ОАД з пусковою обмоткою (ЕД–23, ЕДП–125, ДАО–131–120); двигуни типу ДАО–130.., які спроектовано на основі листів статора й ротора серійних двигунів з удосконаленими обмотками статора шляхом оптимізації їх параметрів; двигуни з трифазною обмоткою для напруг живлення 380В (АИВ71-2Ф2) і 220В (АИВУ71-2Ф2).

Основним недоліком двигунів з пусковою обмоткою підвищеного опору (схема RSIR) є передчасний вихід з ладу цієї обмотки через наявність значних пускових і теплових навантажень (кратність пускового струму – у діапазоні (7 ... 8) в. о.) при зниженні напруги до 165 ... 170 В. Так 90 % відмов електродвигунів поршневих компресорів від їхнього загального числа є вихід з ладу пускової обмотки. У робочому режимі двигунів використовується тільки робоча обмотка. Пускова обмотка після запуску ОАД відключається пусковим реле, що забезпечує її тепловий захист. У загальному випадку ККД двигунів з пусковою обмоткою (RSIR) – в межах (68 ... 72)%. Підвищення ККД на (1,5 ... 2,0)% зазначених двигунів може бути досягнуте підвищенням коефіцієнта заповнення паза (до 0,8), а отже, збільшенням витрат міді.

Таблиця 1.1

Технічні показники асинхронних двигунів для поршневих компресорів

Типи двигунів	$P_n, \text{Вт}$	$n, \text{об/хв}$	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$	Ма- са, кг	ККД, %	Схеми АД, фазозсуваючі та пускові елементи у колі статора
ЕД-23	100	2890	8,5	1,7	3,1	3,35	66	RSIR, пускова обмотка
ЕДП-125	125	2920	8,4	1,69	2,8	3,8	70	
ДАО-131-120	120	2900	9,2	1,9	2,9	3,9	72	
ДАО-130-125-С16П	125	2920	8,8	1,7	2,8	3,72	70	RSIR (PTC) $Rn = 25\Omega_m$
ДАО-130-100-С19М	100	2920	7,5	2,0	2,9	3,43	77	CSR $C_p = 3,9\text{мкФ}$ $C_n = 25\text{мкФ}$
ДАО-130-120-С19М	120	2920	6,0	2,2	2,5	3,85	78	CSR $C_p = 6,2\text{мкФ}$ $C_n = 25\text{мкФ}$
ДАО-130-100-С18П	100	2920	11,5	1,6	2,9	3,43	76	RSCR $C_p = 4\text{мкФ}$ $Rn = 25\Omega_m$
АИВ71-2Ф2	150	2840	6,4	4,0	4,2	3,87	76,7	ТАД
АИВ71-2Ф2	320	2840	7,1	4,1	4,2	5,35	80,3	
АИВУ71-2Ф2	150	2860	8,6	4,3	2,2	4,35	77,6	CSR $C_p = 6\text{мкФ}$ $C_n = 60\text{мкФ}$ $C_p = 10\text{мкФ}$ $C_n = 120\text{мкФ}$
АИВУ71-2Ф2	320	2870	7,2	4,2	2,3	5,86	80,7	

Росту ККД до 77% можна досягти при збільшенні довжини пакетів, відповідно витрат електротехнічної сталі в 1,5 ... 2 рази. Таким чином, будь-яке зменшення витрат активних матеріалів веде до зниження ККД асинхронних двигунів.

Заміна пускового контактного реле на позистор у двигуні ДАО-130-125 -С16П дозволяє підвищити експлуатаційну надійність двигуна (у порівнянні з ЕДП-125), практично не змінивши його пускові характеристики. Схема пуску з позистором (RSIR (PTC)) має наступні переваги: менш чутлива до зміни напруги мережі; напруга запуску нижче, ніж зі звичайним пусковим реле; позистор є одночасно додатковим захисним елементом допоміжної обмотки.

Покращити енергетичні й експлуатаційні показники двигунів дозволяє застосування схем з робочим конденсатором і пусковими елементами, у якості яких використовуються пускові конденсатори або позистори. Схеми RSCR і CSR мають ряд переваг у порівнянні зі схемою RSIR (PTC), а саме: краще використання габариту двигуна (у робочому режимі використовуються робоча й допоміжна

обмотки); збільшення ККД на 6...8% за рахунок часткової або повної компенсації зворотного поля при номінальному навантаженні.

Слід зазначити, що застосування схеми включення RSCR поліпшує експлуатаційні показники ОАД, але при цьому не усуває основний недолік - наявність значних пускових струмів і пов'язане з ними прискорене старіння ізоляції допоміжної обмотки, а також не дозволяє повною мірою використовувати встановлену потужність робочого конденсатора. Вирішує цю проблему використання пускового конденсатора (схема CSR), вибором ємності якого можна одержати необхідний пусковий момент. При цьому зменшується витрата активних матеріалів без зниження техніко-економічних показників двигуна.

Для схем RSIR, RSIR (PTC), RSCR характерні низькі пускові моменти (LST), схеми CSR, CSIR забезпечують високі пускові моменти (HST) [136]. Коефіцієнт корисної дії розглянутих трифазних асинхронних двигунів (табл. 1.1) знаходиться у межах 77...81%, однофазних асинхронних двигунів – не більш 78% (схема CSR). Однак застосування ТАД обмежене, що пов'язано з необхідністю використання трифазної мережі живлення.

Експериментальні дослідження розподілу втрат герметичного поршневого компресора з чотириполюсним трифазним асинхронним двигуном при різних умовах його роботи [172] показали, що основними втратами є електричні. Вони знаходяться у діапазоні 25...60% від загальних втрат..

Аналіз схемних рішень нерегульованих АД герметичних поршневих компресорів показав, що їх технічні та масо – габаритні показники істотно залежать від конструктивних параметрів двигунів (довжини пакета, типу й параметрів обмотки та попередньовключених елементів у ланцюзі статора). Найменш надійні й мають низькі значення номінальних коефіцієнтів корисної дії у межах 68...70% однофазні двигуни з пусковою обмоткою статора, вищі ККД на рівні 77...78% – у двигунів з робочим і пусковим конденсаторами.

Однак, як показують дослідження (див п 1.2.2), ККД асинхронних двигунів, які працюють у складі ротаційних і герметичних поршневих компресорів, зменшується на 10...40 % від їх номінальних значень, що призводить до зниження

енергоефективності холодильного обладнання. Тому вдосконалення традиційних АД, як складових ЕМС, з врахуванням характеру навантаження, є одним із підходів створення енергоефективних ЕМПЕ для умов змінного навантаження.

1.3.2 Підходи до проектування АД з врахуванням умов експлуатації

Проектування є однією з найважливіших ланок у процесі створення конкурентоспроможних ЕМПЕ, яке має враховувати новітні технології, тенденцію спеціалізації, характеристики конкретних електроприводів і технологічні вимоги до ЕМС, та їх оптимальних варіантів за обраними критеріями оцінки. Розроблення серійних АД традиційно здійснюється шляхом їх проектування для номінальних режимів роботи за умови сталого навантаження [71, 94, 99, 111] та оптимальним їх проектуванням за цим припущенням [57, 112, 142, 158, 167, 206]. Однак, при проектуванні двигунів необхідно враховувати особливості умов їх експлуатації. Наприклад, для герметичних компресорів АД розробляються для режиму з максимальним сталим навантаженням і за максимальної температури навколишнього середовища (32°C), хоча 80% робочого часу холодильна установка функціонує з неповним навантаженням і при менших температурах конденсації.

Значна увага приділяється вченими до оптимального проектування АД, які працюють у нестационарних режимах: динамічних при багатьох реверсах (до 10000 у годину); пуску і гальмування; регулювання частоти обертання; короткочасових (з часом вмикання менш ніж 10 хвилин); з пульсуючим і періодичним навантаженням [11, 141, 182, 183, 185,].

Для режимів, що відповідають умовам змінного навантаження, неможливо використовувати серійні двигуни, які розраховано традиційними методами для тривалих номінальних режимів роботи S1. В реальних режимах ЕМПЕ недовантажені, що призводить до нераціонального використання активних і конструкційних матеріалів. Тому, проектування ЕМПЕ з нестандартними умовами експлуатації, зі змінним навантаженням тощо, повинно відбуватися з врахуванням цих умов.

Набуває розвитку індивідуальне проектування електромеханічних перетворювачів, яке пов'язане з особливостями об'єктів і вимогами щодо їх використання. Максимальна індивідуалізація ЕМПЕ потребує оптимального їх проектування з врахуванням особливостей режимів їх роботи у складі конкретного обладнання, що відображає цілеспрямованість та обґрунтування вибору функції мети.

Для оптимального проектування електродвигунів використовують підходи, які засновано на використанні універсального критерію – зведених витрат, що включають втрати на виготовлення та експлуатацію ЕМПЕ [5, 6, 162], або критеріїв, що підкреслюють особливості режимів роботи та задовольняють вимогам до технічного завдання [5, 183]. Для АД з перетворювачами частоти запропоновано діапазонні критерії з циклічним навантаженням для режиму роботи S8 – щорічні приведені затрати за повний цикл роботи двигунів [162].

Так, для балансирих машин на основі АД із забезпеченням раціональних умов їх гальмування обирають в якості критерію оптимізації максимальне відношення максимального електромагнітного моменту двигуна до струму, який йому відповідає [5].

Оптимізаційне проектування АД для поршневих компресорів ефективно за максимальним ККД, реалізація якого для статичних режимів (з урахуванням сталого навантаження) при незмінному штампі (зі стандартними листами статора й ротора серійних двигунів) дозволяє підвищити ККД на (2 ... 4)% за рахунок зміни параметрів обмотки [112, 158, 167].

Оскільки робочі режими двигунів поршневих компресорів характеризуються періодичними змінами частоти обертання ротора, струмів, електромагнітного моменту, а також значними величинами їх пульсацій, що є причиною зростання витрат, споживаної потужності і, отже, зниження енергетичних показників (зокрема коефіцієнта корисної дії) [7, 169, 226], то одним із напрямків підвищення енергоефективності традиційних АД для ГПК є визначення їх конструктивних параметрів (та параметрів схеми заміщення) при оптимальному їх проектуванні за критерієм максимуму ККД з урахуванням реального навантаження у квазісталих

режимах. Для цього необхідно сформулювати критерій оцінки ефективності квазісталіх режимів асинхронних двигунів.

Традиційно підвищення енергоефективності *електромеханічних перетворювачів енергії* для ЕМС з періодичним навантаженням здійснювалось шляхом оптимізації їх конструкції (геометрії статора і ротора, схемних рішень обмотки статора, фазозсуваючих елементів у її колі тощо) для сталіх режимів (статичних) [112, 158, 167] та врахуванням особливостей робочих режимів [11]; застосування сталей з меншими магнітними втратами та з порошкових матеріалів [154] і обмоткових теплостійких матеріалів; використання регульованого приводу [37, 38, 73, 55, 92, 136, 137, 142, 201, 222, 210, 211].

Для дослідження режимів роботи ЕМПЕ у складі систем зі змінним навантаженням важливим напрямком є розробка і удосконалення комплексних математичних моделей та методів їх аналізу з врахуванням особливостей квазісталіх режимів.

1.3.3 Перспективи розвитку регульованих ЕМПЕ

Тенденція використання регульованого електроприводу швидко поширюється на електромеханічні системи, які працюють в умовах змінного навантаження (компресорне і насосне обладнання), що дозволяє покращити техніко-економічні показники ЕМПЕ у робочих режимах, мінімізувати втрати енергії та розширити технологічні можливості обладнання, а також вирішити проблеми надійності та ресурсозбереження ЕМС [47, 72, 108, 201]. Більш ефективним для регулювання продуктивності даних об'єктів є плавне регулювання частоти обертання двигунів, що забезпечується використанням однієї із систем регулювання: тиристорний регулятор напруги-асинхронний двигун» (ТРН-АД); «перетворювач частоти – асинхронний двигун» (ПЧ-АД). Система ТРН-АД більше проста й дешевша, ПЧ-АД має кращі регульовальні можливості й більш економічна [38, 55, 73, 142, 181].

Діапазони регулювання частоти обертання ротора сучасних двигунів малої потужності (до 1 кВт) для насосів – 1:2, для компресорів – 1:2...1:4 (4,5). Для

компресорів і насосів середньої потужності використовуються в основному трифазні асинхронні двигуни з частотними перетворювачами. Однак, їх застосування для компресорів потужності до 500 Вт недоцільно, що обумовлено високою ціною електроприводу [137]. В даний час холодильні установки, які потребують невеликі діапазони регулювання частоти обертання двигунів компресорів, вимагають розробок спеціалізованих для холодильної техніки електроприводів.

Робочі режими кожного з використаних типів регульованих двигунів у складі технологічного обладнання мають притаманні для електромеханічної системи конкретного обладнання особливості, які потребують їх визначення шляхом комплексних досліджень, як чисельних, так і експериментальних.

Питання дослідження особливостей робочих режимів системи ПЧ-АД у складі герметичного компресора розглянуто в роботах [137, 201]. Авторами запропоновано використовувати для даного електроприводу чотири - та шестиполюсні асинхронні двигуни з меншими розмірами лобових частин і збільшеним числом витків обмотки статора при живленні їх напругою з частотою 100 Гц і 150 Гц, що забезпечує підвищення ефективності та зменшення матеріалоемності двигунів.

Створення, з невеликими капітальними витратами, системи регулювання напруги АД на основі транзисторних або тиристорних перетворювачів для поршневих компресорів обґрунтовано авторами [36 – 38] за результатами проведених досліджень електромагнітних і електромеханічних процесів. В роботі [36] запропоновано функціональні схеми однофазних асинхронних двигунів з тиристорним регулятором напруги і перетворювачем частоти, обрано схеми з пусковою обмоткою і позисторним пуском RSIR (PTC) та з робочим конденсатором і позистором RSCR. Однак, як показав аналіз (табл. 1.1), номінальні ККД двигунів зі схемою RSIR (PTC) не більш 70%, що не ефективно для ГПК.

На ринку регульованого електроприводу конкуренцію системам ПЧ-АД створюють синхронні двигуни з постійними магнітами (PMSM - Permanent Magnet Synchronous Motors), безщіткові (безконтактні) двигуни постійного струму (BLDCM – Brushless Direct Current Motors) та вентильно-індукторні двигуни (SRM - Switched Reluctance Motors), що складаються з індукторної машини з реактивним (без

обмотки) ротором і напівпровідникового комутатора з мікропроцесорним керуванням.

Треба підкреслити, що для двигунів типу SRM [233] науковцями використовуються різні назви і відповідно аббревіатури: вентильно-індукторні – ВІД [58 – 60, 82 – 88, 95, 96, 103 – 106, 138, 139, 159, 163], реактивні індукторні двигуни – РІД [97, 174], вентильно-індукторні реактивні двигуни – ВІРД [64 – 67, 160] , вентильно-реактивні – ВРД [161, 164, 165, 173, 175, 177 – 179]. В даній роботі використано термін "вентильно-індукторні двигуни" та в окремих статтях – ВРД [23, 28].

Вентильно-індукторні двигуни по енергетичних характеристиках не уступають вентильним двигунам з постійними магнітами, мають високий ККД у широкому діапазоні частот обертання ротора. У той же час вони конструктивно значно простіші, більш технологічні, надійні та дешеві [82, 83, 229]. Перспектива використання ВІД обумовлена реалізацією ефективного регулювання продуктивності обладнання (насосів, компресорів, верстатів-гойдалок тощо) шляхом зміни частоти обертання двигунів згідно вимог технологічних процесів [9, 133, 160, 210, 211, 233].

Подальшим розвитком ЕМПЕ є синхронні реактивні двигуни зі змінним опором ротора (SynRM) [246, 247]), які виробляються фірмами ABB (Швейцарія), KSB (Німеччина), REEL (Італія) для приводу насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів, тощо. Перевагами двигунів SynRM є менші габарити і втрати в роторі (на рівні 20...35%), ніж АД, а також вищі ККД, забезпечення економії енергії за рахунок регулювання частоти обертання.

Саме завдяки використанню новітніх енергозберігаючих технологій в компресоро- і насособудуванні: регуляторів змінної продуктивності, плавного керування частотою обертання двигунів, цифрового керування – розширюються експлуатаційні можливості сучасного обладнання зі змінним навантаженням. Наприклад, компресори з нерегульованими ЕМПЕ забезпечують значення COP у діапазоні 1,1...1,4 в залежності від типу двигуна, марки холодоагенту, конструкції

компресора. Регульований привод дозволяє збільшити коефіцієнт ефективності ГПК до 1,8.

Розробка і впровадження регульованих ЕМПЕ, як складових конкретних ЕМС, що працюють в умовах змінного навантаження, вимагає подальшого більш глибокого вивчення квазісталих режимів, розроблення засобів щодо їх створення відповідно до умов експлуатації.

1.4 Вентильно-індукторні двигуни: особливості, переваги, недоліки

Одним з напрямків розвитку електромеханічних перетворювачів енергії є створення вентильно-індукторних двигунів, які по суті, є електромеханотронною системою завдяки функціональній інтеграції електромеханічного перетворювача енергії та електронної системи керування (СК). Складовими ВІД (рис. 1.2) є індукторна машина (ІМ), електронний комутатор (К), який підключений до випрямляча (В) паралельно з фільтром – конденсатором С, система керування (СК) на основі датчика положення ротора [82]. Комутатор забезпечує живлення фаз ІМ однополярними імпульсами напруги прямокутної форми, а система керування – електромеханічне перетворення енергії електричною машиною відповідно до алгоритму керування та сигналам зворотного зв'язку.

Магнітопроводи статора і ротора ВІД мають явнополюсну шихтовану структуру. Якість перетворення електричної енергії в механічну визначається у ВІД в значній мірі співвідношенням зубців (полюсів) статора z_1 і ротора z_2 [65, 104, 227, 233]. Основними конструктивними типами виконання активної зони (конфігурації) ВІД, які визначають співвідношення z_1 і z_2 , для трифазних ($m = 3$) і чотирифазних ($m = 4$) двигунів вважають відповідно типи конфігурацій 6/4, 12/8 та 8/6 [84, 233] і – 6/4, 6/8 та 8/6, 8/10 [67]. В даній роботі обрана для дослідження базова конфігурація 6/4 (рис. 1.2).

Принцип роботи ВІД базується на взаємодії найближчого полюса ротора зі збудженим в цей момент полюсом статора. На рис. 1.2 збуджена фаза АХ. В даному

випадку полюси статора (а-а) і ротора по повздовжній осі співпадають, що відповідає узгодженому положенню ротора двигуна і прийнято за початкове. При вимкненні фази АХ і вмиканні фази ВУ (не позначена) до збуджених зубців ($b - b$) притягнуться найближчі зубці ротора. Поле повертається за часовою стрілкою на кут $2\pi/z_2$, ротор – у протилежному напрямку на кут, який визначається як:

$$\frac{2\pi}{z_1} - \frac{2\pi}{z_2} = \frac{2\pi(z_1 - z_2)}{z_1 \cdot z_2}. \quad (1.8)$$

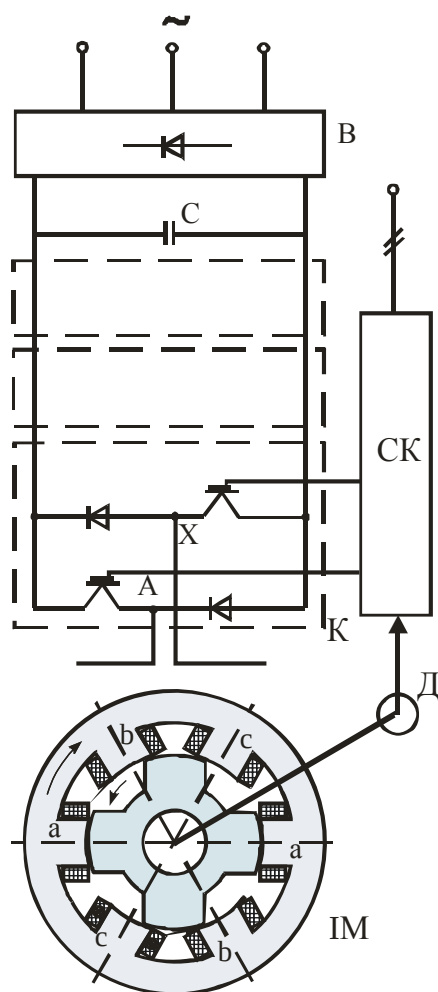


Рис.1.2 Функціональна схема ВІД

На кожному такті комутації ротор двигуна займає положення від неузгодженого, коли зубець статора розташований супротив паза ротора, до узгодженого його положення. Безперервне обертання ВІД забезпечується перемиканням завдяки комутатору котушок полюсів статора відповідно до кутових положень ротора. Керування двигуном (вибір моментів часу вмикання і вимикання

фаз, формування необхідних імпульсів струму) виконується завдяки системі керування.

Робочі режими ВІД, навіть при постійному навантаженні, є безперервними перехідними процесами, що обумовлено комутацією фаз. Згідно енергетичному підходу опис процесів електромеханічного перетворення енергії та розгляд балансу електричної, магнітної та механічної енергії у ВІД проводиться на інтервалі комутації однієї фази T_k , який розраховується за формулою (1.8). Розрахунок ВІД здійснюється на основі енергетичних діаграм – низки залежностей потокозчеплення фази від струму фази $\psi_\phi = f(i_\phi)$ для фіксованих положень ротора за допомогою чисельних розрахунків або експериментальним шляхом. Визначення енергії, що перетворюється у вентильно-індукторних двигунах з електричної W_{el} в механічну (коенергію) $W_{коен}$, дає можливість оцінити їх середній момент і потужність.

Баланс електромеханічного перетворення енергії описується формулою

$$pdt = W_{el} + W_{коен} + W_{магн}, \quad (1.9)$$

де pdt – електрична енергія, що споживає двигун за проміжок часу dt ; W_{el} – електрична енергія за той же час; $W_{коен} = p_{мех}dt$ – частина енергії магнітного поля, що витрачається на здійснення механічної роботи (коенергія); $W_{магн} = p_W dt$ – частина енергії, що отримана від джерела живлення й витрачена на збільшення енергії магнітного поля.

Особливості ВІД – несинусоїдність електричних і магнітних величин, нелінійність параметрів (індуктивність), м'яка механічна характеристика, підвищені електромагнітні навантаження. Переваги ВІД у порівнянні з АД, що працюють від перетворювачів частоти, зумовлено особливістю конструкції індукторної машини (відсутність обмотки ротора, зосереджені обмотки статора) та комутатора і системи керування (фази обмотки двигуна живляться однополярними імпульсами струму, що дозволяє вибрати прості та надійні їх схеми; завдяки відсутності магнітного зв'язку між фазами ВІД може працювати окремо на кожній фазі незалежно від інших). Це визначає простоту, технологічність і надійність електромеханотронної системи у цілому.

Завдяки своїм високим енергетичним показникам [56, 80, 81], пусковим та регулювальним властивостям (більші моменти при низьких частотах обертання, гнучке керування двигуном) та можливості оптимального регулювання процесу електромеханічного перетворення енергії ВІД є перспективними для ЕМС, що працюють в умовах змінного навантаження [70, 157, 171, 205, 208, 209, 217, 224, 229, 236]

Крім того, вентильно-індукторним двигунам притаманні *недоліки*., мають підвищені електромагнітні навантаження. Для ВІД характерні пульсації струмів, електромагнітного моменту і частоти обертання ротора, високий рівень шумів і вібрацій, вони мають значні відходи при штампуванні сталі.

Тому створення ВІД потребує обґрунтування вибору комутатора, розроблення конструкції індукторної машини із забезпеченням технологічних вимог, формування ефективних і надійних робочих режимів з врахування навантаження.

1.4.1 Аналіз та вибір комутаторів ВІД

Вентильно-індукторні двигуни мають різні конфігурації магнітної системи

При цьому кількість силових ключів перетворювача ВІД на відміну від перетворювача асинхронного електропривода з тим же числом фаз буде рівним або меншим.

Для формування фазних струмів ВІД схеми повинні мати можливість створення трьох режимів: підключення фази двигуна до джерела живлення (режим Р2), замикання фази (режим Р1), зворотного підключення фази до конденсатора фільтра (режим Р0), а також незалежного керування фазами. Аналіз технічних рішень [38, 102, 135, 222, 230, 238] показав, що комутатори поділяються за схемами: з одним ключем на фазу; з біфілярною обмоткою із середньою крапкою; несиметричний напівміст і схеми комутаторів на його основі (схема Міллера); схеми із С-скиданням.

Головною перевагою схеми комутатора з одним ключем на фазу є її простота, істотним недоліком – відсутність режиму «Р0», що приводить до

помітного зниження енергетичних показників. Використання у ВІД схем перетворювачів з біфілярною обмоткою досить дорого й не завжди ефективно.

Комутатор зі схемою несиметричного напівмоста реалізує всі три режими, може застосовуватися для будь-якого числа фаз та має високу надійність. Крім того, при узгодженому включенні котушок відсутній магнітний зв'язок між фазами. Недолік комутатора зі схемою несиметричного напівмоста – велика кількість силових ключів і зворотних діодів (по два на фазу). Прагнення до їх мінімізації привело до об'єднання фаз і використанню «загальних» ключів.

Схема вдосконаленого несиметричного напівмоста (схема Міллера) для чотирифазного двигуна конфігурації 8/6 використовує один загальний ключ для двох фаз. Недоліки схеми: можливість застосування для ВІД тільки з парним числом фаз, неможливість реалізації незалежного живлення кожної фази. Перевагою комутатора за цією схемою є відсутність магнітного зв'язку між фазами при узгодженому включенні її котушок та висока надійність за відсутності загального нульового проводу.

Комутатор зі схемою із С-скиданням забезпечує коливальний процес повернення енергії. У схемі, крім конденсатора фільтра використовується додатковий конденсатор скидання C_{CB} , на який перекачується енергія при спаданні струмів фаз. Недоліки схеми: неможливість створення режиму «P1».

Аналіз схем комутаторів [138] показав переваги схеми перетворювача із С-скиданням і коливальним поверненням енергії, у якому використовується один силовий ключ і один зворотний діод на фазу, а також загальний ключ переривника. Дослідження зразка ВІД з комутатором цього типу [139] є недостатніми, на думку авторів, щоб зробити остаточний висновок про раціональність його використання з урахуванням особливостей робочих режимів та регулювання.

В результаті порівняльного аналізу для ВІД, що досліджуються в роботі, вибрано комутатори з С-скиданням та коливальним процесом перетворення енергії та за схемою несиметричного напівмоста.

1.4.2 Діапазони керування частотою обертання ВІД

Оскільки вентиляно-індукторні двигуни принципово не можуть працювати без електронного комутатора, неякісне керування ними здатне нівелювати всі їх переваги. Саме тому алгоритм керування частотою обертання ротора ВІД є одним з вирішальних факторів забезпечення високих техніко-економічних показників електромеханічних систем на їх основі.

Для вентиляно-індукторних двигунів характерні три діапазони керування [227] частотою обертання ротора (рис. 1.3). Перший з них (Region 1) – діапазон постійного моменту (Constant Torque Region) за номінальним значенням струмів фаз, другий (Region 2) – діапазон постійної потужності (Constant Power Region, третій (Region 3) – діапазон різкого зменшення потужності (Falling Power Region). Реалізація цих режимів можлива завдяки системі керування ВІД.

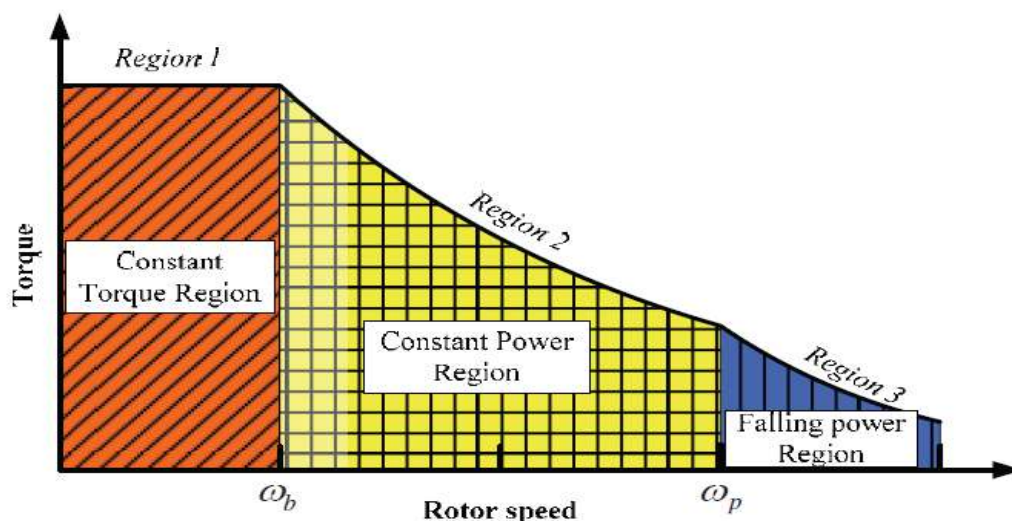


Рис. 1.3 Діапазони керування частотою обертання ротора ВІД

Комутатор фаз спільно з датчиком положення ротора, який виробляє сигнал θ_i поточного значення кута повороту ротора, забезпечують режим комутації фаз. Основні його алгоритми [104]:

- одиночна симетрична комутація, коли в кожний момент часу працює тільки одна фаза, тобто відбувається почергове перемикання фазних обмоток: А-В-С-А-...;
- парна симетрична комутація. При цьому в кожний момент часу одночасно збуджуються дві суміжні фази: АВ-ВС-СА-АВ- Застосування такого алгоритму збільшує вдвічі тривалість протікання струму через фазу, що зменшує вплив

перехідних процесів на роботу двигуна, особливо при високій частоті обертання й збільшує амплітуду моменту в $\sqrt{2}$ раз;

- змішана несиметрична комутація, коли працюють одна або дві фази: - А-АВ-В-ВС-С-СА-А Застосування такого алгоритму комутації дозволяє зменшити пульсації моменту за допомогою зменшення струмів при включенні двох фаз.

Кути комутації (вмикання $\theta_{вм}$ і вимикання $\theta_{вим}$) розширюють регулюючі властивості вентильно-індукторного електроприводу, але в той же час вимагають їх взаємоузгодження з напругою керування $U_{кер}$ [86, 164]. Для формування ефективних режимів роботи ВІД компресорного обладнання тощо необхідно розробляти алгоритми керування частотою обертання ротора з урахуванням характеру навантаження із забезпеченням технологічних вимог .

1.4.3 Особливості проектування і математичного моделювання ВІД

При проектуванні вентильно-індукторних двигунів виникає необхідність враховувати вплив комутатора на електричну машину і навпаки та особливість електромеханічного перетворення енергії. Робочі режими ВІД, навіть при постійному навантаженні, є безперервними перехідними процесами (квазісталі режими), що обумовлено комутацією фаз, і характеризуються несинусоїдністю електричних і магнітних величин. Розподіл магнітної індукції суттєво змінюється від кута положення ротора. При частковому перекритті зубців статора і ротора і збільшені еквівалентного повітряного проміжку можливе значне локальне насичення головок зубців.

Ці обставини підкреслюють, що класичні методики, які використовуються для проектування традиційних електричних машин, не доцільні для ВІД. Для їх проектування необхідно враховувати перехідні процеси (квазісталі режими). Для проектування ВІД використовують наступні підходи: енергетичний, польовий, підхід на основі розрахунку перехідних процесів, а також їх поєднання – комбіновані підходи [105, 190, 191, 196].

В загальному випадку проектування ВІД засновано на розв'язанні системи нелінійних неоднорідних диференціальних рівнянь, що потребує значних чисельних витрат. Тому на етапі попереднього (ескізного) проектування ВІД використовують допущення, які дозволяють суттєво спростити розрахунки і, відповідно, зменшити трудозатрати. Це обумовлює актуальність розробки методик розрахунку ВІД на даному етапі. З другого боку зростають потреби в оптимальних структурах ВІД для конкретного обладнання із забезпеченням технічних і технологічних вимог.

Розвитку теорії, теоретичним засадам проектування і методам математичного моделювання вентильно-індукторних двигунів присвячено наукові праці вчених Мілєра Т., Крішмана Р., Ткачука В.І., Красовського А.Б., Афанасьєва А.А., Голандцева Ю.А., Пахоміна С.А., Кузнєцова В.А., Бичкова М.Г., Птаха Г.К., Матвєєва А.В., Малафєєва С.І., Римши В.В., Віноградова В.Л., Шабасєва В.А., Ільїнського Н.Ф. тощо.

Можна виділити два етапи проектування ВІД: попередній і уточнений [48]. При цьому на кожному етапі проектування використовуються відповідні математичні моделі з різним ступенем складності. Математичне моделювання є базою для дослідження і проектування ВІД. Тобто, для даного типу ЕМПЕ питання проектування і математичного моделювання тісно взаємопов'язані.

На попередньому етапі проектування ВІД визначаються конструктивні параметри індукторної машини з використанням інженерних методик (за відсутності математичного моделювання), що використовують машинну сталу [104, 233] або її модифікації [105, 212], даних за довідників [84, 104]. Електромагнітний розрахунок параметрів ВІД, розрахунок втрат і характеристик двигунів на даному етапі проводиться на основі енергетичного підходу. Для уточнення розрахунків використовують польові або коло-польові математичні моделі [45, 46, 163, 177, 190, 220].

Як було підкреслено раніше проектування ВІД засновано на розв'язанні системи нелінійних неоднорідних диференціальних рівнянь. Ці обставини підкреслюють, що класичні методики, які використовуються для проектування традиційних електричних машин, недоцільні для ВІД. Тому, використовують ряд

припущень при незначному зниженні точності та зменшення часу розрахунків [104, 105, 173, 196, 233]. Це обумовлює актуальність розроблення методик на етапі попереднього (ескізного) проектування, що дозволяє скоротити час визначення раціональної магнітної структури із забезпеченням технічних вимог для конкретного обладнання.

Математичні моделі ВІД відрізняються як методами визначення параметрів обмотки і характеристик магнітного поля, так і електромагнітного моменту, який залежить від струму фази і кутового положення ротора. Визначення нелінійної функції потокозчеплення $\psi(i, \theta)$ здійснюється за допомогою використання: приблизних аналітичних виразів магнітного кола ("енергетичний" метод – криві Мілера), кусково-лінійної апроксимації залежностей потокозчеплення (або індуктивності) від струму і кутового положення ротора [104, 233], функцій, які приблизно описують реальні криві потокозчеплень: функції Фреліха, квадратичні функції, ряди Фур'є; чисельних методів (скінчених елементів, скінчених різниць) [67, 103].

Математичні моделі ВІД, що побудовано за енергетичним підходом на основі балансу електричної, магнітної та механічної енергій і відповідають циклу комутації однієї фази є спрощеними [105, 196]. Вебер-амперні характеристики для різних кутових положень ротора розраховуються згідно заступної схеми магнітного кола з використанням кусково-лінійної апроксимації кривої намагнічування [42, 84, 103, 104, 233]. Це значно спрощує розрахунки і зменшує час, що для них потрібний.

На основі розрахунку локальних і інтегральних величин магнітних і температурних полів ВІД методом скінчених елементів (МСЕ) геометрії визначають геометричні параметри зубцевої зони індукторної машини і щільність струмів в обмотках згідно електромагнітного моменту й у межах температурного режиму відповідно технічному завданню [67]. Розрахунок магнітних систем ВІД виконується шляхом їх комп'ютерного моделювання з використанням методу скінчено-елементного аналізу у різноманітних програмних комплексах, таких як, FEMM, COMCOL, ELCUT, INFOLYTICA, ANSYS MAXWELL [252 – 256]. Завдяки варіюванню параметрів магнітопроводів статора і ротора ще на стадії попереднього

проектування є можливість знайти раціональні варіанти конструкції індукторної машини із забезпеченням технічних вимог.

Комбінований підхід проектування заснований на використанні колопольових моделей моделей [45, 46, 177, 191, 220, 225]. Останнім часом розвивається проектування ВІД з використанням генетичних алгоритмів [205, 213]. Уточнений етап проектування включає дослідження динамічних режимів ВІД на основі комплексних математичних моделей з урахуванням особливостей їх структур і алгоритмів керування на показники конкретного приводу. На цьому етапі здійснюється вибір комутатора та алгоритмів керування [48, 86, 87, 125, 163, 164, 223, 224].

В роботі [157] представлено дослідження динамічних процесів ЕМС, що складаються з силового перетворювача, електродвигуна (шагового або вентильного двигуна малої потужності), датчика положення ротора на основі моделі загальної синхронної машини. Показано, що характеристики перехідних процесів на основі моделі загальної синхронної машини ідентичні отриманим у середовищах MATCHCAD, OrCAD і MATLAB, хоча принципи їх побудови відрізняються.

1.4.4 Розрахунок втрат і енергетичних показників ВІД

Коефіцієнт корисної дії вентильно-індукторних двигунів визначається як відношення потужності на валу до потужності, яка споживається двигуном. Остання розраховується як сума корисної потужності та сумарних втрат двигуна (у обмотках статора, магнітних втрат і механічних). Загальний коефіцієнт корисної дії ВІД визначається з врахуванням втрат у перетворювачі. Важливе місце для адекватної оцінки ККД ВІД займає оцінка магнітних втрат. Для їх розрахунку використовують різні підходи.

Один з них – приблизна оцінка магнітних втрат на основі припущення щодо лінійності кривої намагнічування сталі та рівномірності розподілу поля в товщині листа пакета магнітопроводу, яка забезпечується: формулами, що застосовуються у традиційних електричних машинах; використанням відповідних коефіцієнтів,

виходячи з наявного досвіду проектування ВІД [99, 101]; визначенням втрат від вихрових струмів з врахуванням впливу вищих гармонік завдяки корегуючим коефіцієнтам [190, 196]; використанням гармонійного аналізу кривих індукції та визначенням амплітуди потокозчеплення фази за цикл комутації [133].

Другий підхід враховує несинусоїдний характер розподілу індукції у часі на ділянках магнітної системи ВІД, що здійснюється: за допомогою розкладення кривих індукції в ряд Фур'є і визначенні втрат від окремих гармонік [59]; завдяки використанню реального закону зміни магнітного потоку на різних ділянках магнітного кола [44, 151].

Внаслідок високої частоти комутації обмоток статора втрати в сталі магнітопроводу ВІД можуть бути суттєвими і навіть порівняними з іншими видами втрат. Через це нехтувати втратами в сталі при математичному моделюванні електромеханічних процесів у ВІД не допустимо. При підвищених частотах внаслідок пропорційності втрат від вихрових струмів квадрату частоти перемагнічування магнітопроводу саме вони будуть мати домінуючий вклад у загальні втрати. Найбільш точно визначити загальні втрати в сталі в залежності від максимального в часі і середнього в просторі значення індукції в листі B_m можна за допомогою експериментальних залежностей $P_{cm} = f(B_m)$, що наведено в довідниках [131], але для умови синусоїдності потоку.

У зв'язку з несинусоїдним розподілом у часі індукції в сталі ВІД розрахунок втрат на вихрові струми в них ускладнюється. Окрім цього залежності індукції в функції кута повороту ротора на різних ділянках магнітного кола істотно відрізняються. В роботі [59] застосований метод розрахунку таких втрат, що базується на розкладенні кривих індукції в ряд Фур'є і визначенні суми втрат від окремих гармонік. Але недоліком такого підходу є його громіздкість і залежність результату від кількості врахованих гармонік.

Таким чином, розробка математичних моделей ВІД та методики розрахунку втрат у сталі з урахуванням особливостей їх конструкції, режимів роботи і зміни параметрів магнітного поля є актуальними.

1.5 Вибір засобів математичного моделювання та методів аналізу ЕМПЕ

Високу ефективність при створенні математичних моделей для комплексного дослідження і проектування електромеханічних систем забезпечують сучасні програмні комплекси для імітаційного та структурного моделювання, наприклад MATLAB-Simulink. Оскільки для динамічних і квазісталих режимів характерні миттєві зміни струмів, моментів, частоти обертання ротора зручними за ступенем деталізації, простоти та наочності є імітаційні математичні моделі. Тому в роботі використано загальні принципи імітаційного моделювання в середовищі MATLAB-Simulink [62, 89, 199]. Розвиток математичного моделювання ЕМПЕ в напрямку розробки імітаційних і структурних моделей представлений у працях [60, 96, 155, 223, 241]

Доцільність використання імітаційного моделювання у середовищі MATLAB–SIMULINK для розробки комплексних математичних моделей ВІД з метою дослідження режимів їх роботи обґрунтована у статті [96]. Автором розглянуто загальні принципи побудови цих імітаційних моделей та представлена їх реалізація. Принципи імітаційного моделювання швидко поширюються на ВІД, що підтверджується результатами досліджень [85, 87, 137, 220, 221, , 243, 248, 251].

Задачі аналізу електромагнітних і механічних процесів, а також оптимізації параметрів ЕМП полягають у пошуку глобального екстремуму або достатньо близького до нього екстремуму функції якості в нелінійному багатовимірному просторі. Для нього характерні багатоекстремальність, невизначеність, овражність, що обумовлено наявністю обмежень при розрахунках, технологічних обмежень, а також складними нелінійними зв'язками між функцією якості і вхідними параметрами, що підлягають варіюванню [57, 206]. Час, що витрачено на пошук екстремуму, та результати оптимізації залежать від методу, який використовується. Існує досить багато методів оптимізації, але однозначно відповісти, який з них є найбільш ефективним і універсальним, як показали дослідження [1, 61], не є можливим. Порівняння методів оптимізації проводиться на прикладах розв'язку

тестових завдань, оцінки їхньої ефективності в одержанні точного рішення з мінімальними витратами [168].

Глобальний оптимум функції якості визначається за допомогою глобальних методів пошуку, які включають: глобальний регулярний (метод сканування); випадкові або прямі методи (незалежний випадковий, блукаючий та багатоетапний пошук методом випадкових проб); комбіновані методи глобального пошуку. За допомогою незалежного випадкового пошуку (у технічній літературі відомого як сліпий випадковий пошук, метод проб і помилок або метод Монте-Карло) безпосередньо відшукується глобальний оптимум. Його головна перевага – універсальність та простота логічних операцій.

Існує детермінований аналог методу випадкових проб - Ln_r - пошук [206]. Багатоетапний пошук методом випадкових проб є органічною комбінацією глобального та локального випадкових методів пошуку, які активно використовується для оптимізації електричних машин [33]. Комбіновані методи глобального пошуку припускають визначення положень локальних екстремумів яким-небудь методом незалежного глобального пошуку з наступним дослідженням екстремумів методами спрямованого пошуку. Методи пошуку локальних оптимумів дуже різноманітні. Вони складаються з методів математичного програмування, апроксимації, планування експерименту тощо. Вони будуються за однаковою структурою, тобто містять такі етапи: вибір форми представлення математичної моделі, визначення напрямку руху до оптимуму, визначення довжини кроку пошуку.

У середовищі MATLAB у пакеті Optimization Toolbox реалізований широкий набір алгоритмів для розв'язку задач локальної оптимізації середньої й малої розмірності. Задачі без обмежень вирішуються за допомогою симплексного методу Нелдера-Міда й квазін'ютонських методів. Для рішення завдань із обмеженнями використовуються алгоритми квадратичного програмування [89]. У загальному випадку при дослідженні цільової функції на глобальний екстремум необхідно випробувати різні початкові точки й інтервали пошуку. Для генерування початкових точок використовують метод випадкового пошуку. Однак, при безпосередній оптимізації математичної моделі, що представлена в середовищі MATLAB –

Simulink, випадковий вибір початкових точок (параметрів) значно збільшує час розрахунків.

З метою скорочення машинного часу й зручності подання цільової функції в аналітичному виді пропонується використати метод планування експерименту (МПЕ), що дозволяє визначити параметри, які впливають найбільшою мірою на критерій оптимальності [81]. Загальний підхід до формування вихідних даних та аналізу математичних моделей електричних машин для оптимального їх проектування за допомогою МПЕ представлено в [81].

Вибір схеми планування. Дослідження МПЕ починається з найбільш простих планів – планів першого порядку, тобто з який реалізує всі можливі неповторювані поєднання факторів. При варіюванні на двох рівнях (+1 і -1) повне число усіх можливих поєднань чинників складає $N = 2^k$. ПФЕ являє собою план першого порядку та дає можливість знайти коефіцієнти оцінки рівняння регресії [70]. Однак, не завжди, використовуючи його, можна одержати бажану точність. Дрібний факторний експеримент (ДФЕ) є частиною повного плану. При його використанні скорочується кількість спроб. Плани другого порядку більше ефективні. Наприклад, ортогональний центрально-композиційний план другого порядку (ОЦКП) забезпечує незалежність визначення коефіцієнтів регресії, достатню точність моделі й потребує порівняно невеликої кількості експериментів.

Отримані поліноми (першого й другого порядку) піддаються звичайній процедурі статистичного аналізу: оцінці значимості коефіцієнтів за критерієм Ст'юдента й перевірці адекватності моделі за критерієм Фішера. Остаточним етапом дослідження є аналіз отриманої моделі й знаходження оптимуму. Слід зазначити, що при опису локальної області у випадку одержання адекватної математичної моделі дослідження вважаються завершеними. При опису області оптимуму необхідно попередньо зробити ряд крокових процедур: факторний експеримент, статистичний аналіз, круте сходження по поверхні відгуку [70, 81].

З урахуванням викладеного слід вважати, що математичний опис складних систем та пошук оптимального співвідношення їх параметрів є одним з головних

завдань їх аналізу й синтезу. У випадку складних нелінійних систем – ЕМПЕ, що працюють в умовах змінного навантаження, необхідно знайти оптимальні співвідношення їх параметрів за обраним критерієм враховуючі режимні особливості, отже розробити підхід до їх створення (з урахуванням квазісталіх режимів) з використанням аналітичних залежностей на основі методу планування експерименту (МПЕ). Його математичний апарат ефективний як при розв’язку задач апроксимації, так і для аналізу, синтезу, оптимізації ЕМПЕ. За допомогою МПЕ можна одержати залежності функції мети – критерію ефективності, наприклад, коефіцієнту корисної дії двигунів від сукупності вихідних параметрів двигунів для статичних (сталіх) і усталених режимів з періодичним навантаженням (квазісталіх). Надалі знайти оптимальні режими роботи двигуна у складі ЕМС, що досліджується, за обраним критерієм, та визначити оптимальні конструктивні параметри ЕМП, що їх забезпечують. Переваги МПЕ полягають у значному скороченні часу дослідження, що обумовлює підвищення ефективності цього процесу. Крім того, метод планування експерименту задає логічний чіткий алгоритм розрахунків, чим скористаємось надалі.

1.6 Методи розрахунку електромагнітного моменту ЕМПЕ

Електромагнітний момент, що розвивається ЕМПЕ, визначається як часткова похідна від запасу магнітної коенергії по переміщенню при лінійної постановці задачі. Не врахування нелінійності електромагнітних параметрів двигунів впливає на точність розрахунків електромагнітного моменту для режимів, що пов’язані зі значним насиченням магнітного ланцюга (пускові режими тощо) [49, 249]. Для асинхронних двигунів, що працюють в звичайних експлуатаційних режимах (номінальні ковзання і напруга), впливом нелінійності електромагнітних параметрів на електромагнітний момент (похибка 4%) можна знехтувати [49].

Одним із важливих етапів проектування ВІД є розрахунок механічних зусиль, електромагнітних моментів та на заключному етапі – розрахунок характеристик машини. Електромагнітні моменти залежать від азимутально-орієнтованих

пндемоторних сил взаємодії зубців статора і ротора, азимутальні зусилля – від магніторушійної сили (МРС) фази котушки. Способи розрахунку електромагнітного моменту ВІД базуються на визначенні [79] зміни енергії магнітного поля або коенергії при малому переміщенні, тяжіння у магнітному колі та об'ємної і поверхневої густини електромагнітних сил.

Відповідно першому способу електромагнітний момент визначається:

$$M = \left. \frac{\partial W_M}{\partial \theta} \right|_{\psi = \text{const}} \text{ або } M = \left. \frac{\partial W_\kappa}{\partial \theta} \right|_{I = \text{const}}. \quad (1.11)$$

Для лінійної ділянки залежності $\psi(I)$ при нехтуванні падінням МРС в сталі рівняння (1.11) може бути представлено у вигляді:

$$M = \frac{1}{2} (I\omega)^2 \frac{d\lambda}{d\theta}, \quad (1.12)$$

де I , ω – струм і число витків обмотки фази; $\lambda(\theta)$ – магнітна проникність повітряного проміжку між полюсами статора і ротора.

У режимі локального насичення зони перекриття зубців статора і ротора вираз (1.12) набуває вигляду:

$$M = \left[\frac{1}{2} (I_{\text{нас}} \omega)^2 + I_{\text{нас}} (I - I_{\text{нас}}) \omega^2 \right] \frac{d\lambda}{d\theta}, \quad (1.13)$$

де $I_{\text{нас}}$ – граничне значення струму, що створює індукцію насичення в зоні перекриття зубців.

На основі тяжіння в магнітному колі [77]:

$$M = \oint_S [\bar{r} \bar{T}_n] dS, \quad (1.14)$$

де S – поверхня, яка охоплює об'єм активної зони ротора ВІД; $\bar{r}$ – радіус-вектор зв'язку початку системи координат з елементом dS поверхні S ; $\bar{T}_n$ – сила тяжіння, яка діє зовні на одиницю поверхні S , зовнішня нормаль до якої направлена по орту (вектору) нормалі $\bar{n}$, та розраховується за допомогою тензору натягу:

$$\bar{T}_n = \frac{1}{\mu} (\bar{B}B_n - 0,5B^2\bar{n}). \quad (1.15)$$

Розглянувши різні способи розрахунку електромагнітного моменту ВІД слід зазначити, що при незначній насиченості магнітних кіл наглядним і зручним для аналізу є його визначення через зміну енергії або коенергії магнітного кола при малому переміщенні за формулою (1.11). Для насичених машин необхідне застосування більш точних польових методів розрахунку нелінійних параметрів ВІД (залежностей потокозчеплення або індуктивності фази від кута повороту ротора і фазного струму) та електромагнітного моменту з використанням методу розрахунку об'ємного інтеграла від тензора натягіння Максвелла.

1.7 Формування задач дослідження та створення ВІД зі змінним навантаженням

Представлені особливості і переваги та широкий спектр галузей застосування ВІД є передумовою їх глибоких інтенсивних досліджень за кордоном і в Україні. Фахівцями надалі проводяться дослідження вентильно-індукторних двигунів з метою порівнянні з альтернативними технічними рішеннями: асинхронним приводом [58, 72, 133, 137, 211]; двигунами з постійними магнітами [4, 9, 135, 211]. У технічній літературі розглядаються питання особливостей проектування ВІД: вибір оптимальних співвідношень діаметрів ротора і статора [41, 229] та параметрів магнітопроводу [64, 77, 105, 144, 159, 165], мінімізації пульсацій електромагнітних моментів [40, 48].

Однак, незважаючи на те, що на сьогоднішній день достатньо розглянуті питання проектування і керування ВІД, існують задачі, які пов'язані з особливістю їх експлуатаційних режимів. Це вимагає уточнення закономірностей протікання електромагнітних і електромеханічних процесів ВІД, що працюють у складі електромеханічних систем з періодичним навантаженням, для формування ефективних робочих режимів ВІД із забезпеченням високих значень ККД і зниження пульсацій електромагнітного моменту і частоти обертання ротора.

Дослідженню динамічних режимів вентильно – індукторних двигунів присвячені наукові праці [85, 95, 163, 176, 226, 227, 243]. Поліпшення техніко-економічних показників ВІД здійснюється завдяки раціональному обмеженню рівня струму, напруги живлення та вибору кутів комутації. Останні суттєво впливають на енергетичні показники ВІД та їх робочі властивості. Підходи до керування кутами комутації та аналіз результатів моделювання режимів ВІД за їх зміни наведено в [86, 164, 219, 227, 245]. При цьому питання стабілізації частоти обертання розглядається в основному у контексті зменшення рівня пульсацій електромагнітного моменту завдяки формуванню форми фазного струму [95, 125, 140, 202]. Порівняння результатів моделювання та експериментальних досліджень ВІД представлено недостатньо [88, 95, 145, 202, 211]. Для верифікації розрахунків це, безумовно, необхідно висвітлювати.

Становить інтерес дослідження динамічних режимів системи ВІД – змінне навантаження і оцінка пульсацій частоти обертання ротора і електромагнітного моменту. Оскільки моменти інерції ВІД менші, ніж АД, що мають однакові габарити, питання визначення діапазонів регулювання частоти обертання ротора ВІД, наприклад одноциліндрових герметичних поршневих компресорів, при яких забезпечується допустимий рівень пульсацій частоти обертання, є актуальними. Для цього необхідно розробляти алгоритми керування частотою обертання ротора ВІД для зменшення цих пульсацій та формування енергоефективних режимів роботи з урахуванням характеру навантаження для конкретного обладнання згідно технологічних вимог. Це передбачає розроблення комплексних математичних моделей ВІД для дослідження особливостей їх експлуатаційних режимів з урахуванням навантаження, верифікації результатів чисельних розрахунків, формування характеристик двигунів із забезпеченням енергоефективних режимів.

Актуальними є задачі оптимального проектування ВІД і формування критеріїв оптимізації [143, 144, 176, 203, 216]. Для цього можуть бути використані узагальнені критерії, що базуються на масо-габаритних, енергетичних та економічних показниках [97, 203], а також максимумі електромагнітного моменту [41, 64], мінімумі електричних втрат в обмотках статора [141, 142], тощо.

Важливим є питання уточнення магнітних і механічних втрат даних двигунів. Необхідно також вирішувати практичні задачі по створенню і вдосконаленню вузлів ВІД підвищеної ефективності та реалізації їх експериментальних зразків для дослідження робочих режимів при регулювання і стабілізації частоти обертання ротора.

Посилання [1, 4 – 7, 9, 11, 26, 33 – 48, 55, 57 – 62, 64 – 67, 70 – 74, 76 – 89, 92, 95 – 101, 103 – 108, 110 – 112, 125 – 128, 130 – 145, 147, 148, 151, 155, 157 – 165 – 191, 193, 196, 197, 199, 201 – 208, 210 – 213, 215 – 256] див. список використаних джерел стор. 275-299.

1.8 Висновки до розділу 1

1. На основі аналізу особливостей роботи ЕМС поршневих й ротаційних компресорів, насосних агрегатів, штангових нафтовидобувних установок визначено їх вимоги до технічних характеристик ЕМПЕ. Найбільш жорсткі з них висуваються до приводу герметичних поршневих компресорів: високі значення ККД, надійний пуск, високі кратності максимального моменту. Робочі режими ЕМПЕ у складі обладнання даного типу є квазісталіми, пов'язані з періодичною зміною моменту навантаження і, відповідно, частоти обертання ротора, що негативно впливає на їх енергоефективність. Наприклад, для асинхронних двигунів ККД зменшується у робочих режимах на 3...39 % в порівнянні зі сталим навантаженням, і, як наслідок, зниженню енергоефективності обладнання.

2. Огляд показав, що розповсюдженим типом ЕМПЕ для поршневих компресорів, насосних агрегатів, штангових нафтовидобувних установок є нерегульовані АД. Проблему підвищення енергетичної ефективності серійних АД у складі механізмів з періодичним навантаженням традиційно вирішували шляхом оптимізації двигунів за умов статички (модернізації обмоток і магнітопроводу статора, вибору пускових і фазозсуваючих елементів), застосування маховиків,

використання АД з підвищеним ковзанням та двигунів з електронним керуванням, вентильно-індукторних тощо.

Визначено основні тенденції підвищення енергоефективності ЕМПЕ, що працюють у складі обладнання з періодичним навантаженням – це удосконалення серійних АД з врахуванням умов експлуатації та використання перспективних технологій, у тому числі ЕМПЕ з електронним керуванням, вентильно-індукторних двигунів тощо, які є регульованою електромеханотронною системою. На основі аналізу обрано для дослідження вентильно-індукторні двигуни з реактивним ротором і асинхронні двигуни, з перетворювачами частоти тощо.

3. На теперішній час іноземними та вітчизняними вченими створено наукові основи ВІД, виявлено їх особливості, проведено порівняння з альтернативними рішеннями, представлено шляхи усунення недоліків. Однак, розроблення конкурентно-спроможних ВІД для умов періодичного навантаження вимагає подальшого дослідження і аналізу електромагнітних і електромеханічних процесів за допомогою математичних засобів і експериментальних досліджень, розробки заходів з підвищення енергоефективних режимів ВІД із забезпеченням технологічних вимог.

4. Аналіз особливостей проектування і математичного моделювання АД і ВІД у складі ЕМС зі змінним навантаженням дозволив обрати засоби математичного моделювання та методи аналізу для дослідження їх квазісталих режимів, сформулювати мету і задачі дисертаційної роботи, які представлено в вступі.

РОЗДІЛ 2

ВДОСКОНАЛЕННЯ І РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ІЗ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

2.1 Вимоги до математичних моделей АД для дослідження у складі ЕМС для умов змінного навантаження

Для комплексного дослідження та проектування електромеханічних перетворювачів, що працюють у складі електромеханічних систем в умовах змінного навантаження, їх математичні моделі повинні враховувати особливості режимів експлуатації, забезпечувати спільний аналіз електромагнітних і електромеханічних процесів з урахуванням нелінійності електромагнітних параметрів і втрат у сталі, навантаження, системи керування і адекватно відображати робочі режими і реалізовувати технологічні вимоги щодо зміни параметрів керування. Метод проектного синтезу повинен обиратись з урахуванням складності математичних моделей і значних витрат часових ресурсів обчислювальної техніки для розрахунку показників режиму роботи ЕМПЕ при кожному наборі вхідних змінних параметрів.

Загальна постановка завдання оптимального проектування включає задачі математичного моделювання об'єкта дослідження, формування вимог щодо електромеханічних перетворювачів з боку технологічного обладнання, вибору параметрів варіювання, критерію оптимальності, обмежень і методів пошуку.

Для електроприводів, в яких момент навантаження на валу не залежить від кута повороту ротора, ця задача може бути розв'язана за допомогою окремого оптимального проектування електромеханічного перетворювача і навантажувального механізму.

Оптимальне проектування асинхронних двигунів традиційно виконують на основі їх математичних моделей для сталих режимів роботи. Безперечно, що

застосування двигунів, що спроектовані для сталих режимів приводів механізмів (компресорів, верстат-гойдалок, вібраторів тощо), значення M_c яких залежить від кута повороту ротора, ні є оптимальним рішенням. В цьому випадку задача проектування повинна розв'язуватись комплексно при сумісному аналізі механізму і двигуна, режими роботи якого є квазісталіми. Отже, математичні моделі повинні адекватно досліджувати характеристики АД в перехідних режимах.

Дослідження квазісталіх режимів асинхронних двигунів можливо проводити з використанням математичної моделі бібліотеки SimPowerSystems [89]. Модель не враховує особливості структури віток обмотки статора та їх з'єднання при необхідності з резисторами, конденсаторами в зовнішньому колі, однак має окремі блоки. Тому, для дослідження динамічних та сталих режимів роботи однофазних АД доцільно застосування такої математичної моделі, що дозволяє реалізувати довільні структури віток обмотки статора та схеми з'єднання їх між собою та із елементами зовнішньої мережі. Крім того, математична модель повинна враховувати окремо несиметрію, яка виникає як внаслідок особливості конструкції АД, неодноразове підключення до мережі його фаз та змінного моменту опору.

В Інституті електродинаміки розроблена універсальна математична модель для дослідження асинхронних двигунів [49], що задовольняє наведеним вимогам: враховує просторові гармоніки МРС, несиметрію й нелінійність електромагнітних параметрів, а також особливість схемних рішень обмоток статора (двофазних - та трифазних розподілених обмоток статора) і елементів у зовнішньому його колі (конденсатори, позистори тощо) та їх підключення до однофазної мережі. В моделі схеми включення реалізуються завдяки матриці включення, в якості змінних прийнято незалежні струми віток обмотки статора і проекції симетричних складових просторових векторів струмів ротора. Це зменшує кількість змінних і дозволяє отримати систему рівнянь електромеханічної рівноваги, що не залежить від кута повороту ротора. На основі цієї моделі в роботі [53] запропонована розрахункова схема ЕМС, яка складається з АД, батарей конденсаторів поперечної і повздовжньої компенсації та лінії з опором r_d , який можна визначити як відношення заданого

зменшення напруги ΔU до струму I в лінії. Модель врахує несиметрію батареї конденсаторів і зміну схеми їх з'єднання за переходу від пускових режимів АД до робочих.

В результаті аналізу сучасних методів математичного моделювання в роботі обрано загальні принципи імітаційного моделювання в середовищі MATLAB-Simulink для розроблення математичних моделей ЕМПЕ, як складових електромеханічних систем зі змінним навантаженням. Дослідження режимів електромеханічних систем обумовлює вимоги до математичних моделей АД стосовно їх інтеграції до комплексних моделей ЕМС, а також врахування зміни втрат і електромагнітних параметрів АД. Цим вимогам задовольняє математична модель асинхронного двигуна електромеханічної системи при імітаційному та структурному моделюванні [155], яка використана у роботі та отримала розвиток в [27, 156] для дослідження насосного обладнання. В той же час адекватне відображення робочих режимів двигунів неможливе без врахування реального характеру навантаження та, в зв'язку з цим, потребує уточнення розрахунку їх показників і характеристик у квазісталих режимах. Таким чином, необхідно розроблення загальних математичних засобів дослідження, аналізу і проектування ЕМПЕ з врахуванням режимних особливостей, характеру навантаження тощо.

2.2 Загальна структура математичної моделі для дослідження і аналізу квазісталих режимів ЕМПЕ зі змінним навантаженням

Для дослідження і аналізу квазісталих режимів електромеханічних перетворювачів енергії, як складових електромеханічних систем зі змінним навантаженням, розроблено відповідно загальну структуру математичної моделі (рис. 2.1) та метод аналізу. Загальна структура складається з блоків: динамічних математичних моделей асинхронних і вентильно-індукторних двигунів; навантаження; алгоритму розрахунку інтегральних значень частоти обертання ротора, струмів, моментів та їх пульсацій, втрат, коефіцієнтів потужності і корисної дії у квазісталих режимах.



Рис.2.1 Загальна структура математичної моделі для дослідження квазісталих режимів ЕМПЕ зі змінним навантаженням

Блок навантажень включає:

- 1) періодичне навантаження, що представлено залежністю $M_c = f(\theta)$ від кута

повороту ротора θ та прикладено на періоді 2π у межах $\frac{7}{9}\pi (\theta_1 = \frac{2\pi}{9}; \theta_2 = \pi)$, що характерно для одноциліндрового поршневого компресора одинарної дії;

2) пульсуюче навантаження, яке прикладене на періоді π у межах $\frac{7}{9}\pi (\theta_1 = \frac{2\pi}{9}; \theta_2 = \pi)$ або представлене розрахунковою діаграмою з косинусоїдною формою імпульсів $M_c = M_{c0} |\cos(\nu\omega_0 t)|$, що характерно для двоциліндрового поршневого компресора з зсувом робочих циклів на 180° ;

3) змінне навантаження системи водопостачання багатоповерхового будинку, що змінюється протягом доби згідно добовому графіку;

$$4) \text{ «вентиляторне» навантаження у вигляді } M_c(t) = M_{c0} + k \cdot \omega_r^2(t). \quad (2.1)$$

У випадку періодичного навантаження для розрахунку показників квазісталих режимів необхідно визначати період навантаження (повторюваності) T_n , який потрібен для усереднення значень струмів, моментів, частоти обертання ротора у квазісталих режимах. Він визначається як часовий проміжок між двома сусідніми моментами співпадання в часі максимумів моменту навантаження $M_c(t)$ і моменту асинхронного двигуна $M(t)$.

Блок математичних моделей ЕМПЕ представлено динамічними моделями АД з трифазними і з двофазними розподіленими обмотками з попередньовключеними елементами (конденсаторами, позисторами тощо) у колі статора для підключення їх до однофазної мережі. В результаті розрахунків перехідних процесів отримаємо часові залежності зміни миттєвих значень струмів статора і ротора, кутової частоти обертання ротора АД, моменту опору (періодичного навантаження) $M_c(\theta)$, корисного моменту на валу АД $M_2(\theta)$ і його середнього значення $M_{2cp}(\theta)$, за яким розраховується режим із сталим моментом опору.

Розрахунок квазісталих режимів виконується за умови, коли середні значення корисного моменту на валу та моменту періодичного навантаження стають рівними $M_{2cp}(\theta) = M_{csp}$. Середній момент опору двигуна за період навантаження

$$M_{ср} = \frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} M_c(t) dt; \quad (2.2)$$

Алгоритм розрахунку показників АД у квазісталих режимів наведено на рис. 2.2. Інтегральні значення показників двигунів у квазісталих режимах при змінному навантаженні [17]:

середня кутова частота обертання ω_{rcp}

$$\omega_{rcp} = \frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} \omega_r dt; \quad (2.3)$$

$$\text{середні значення струмів фаз статора } i_{skcp} = \frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} i_{sk} dt, \quad (2.4)$$

k – індекс числа фази ($k=1...m$).

Діючі значення фазних струмів фаз статора I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} розраховуються як

$$I_{sq} = \sqrt{\frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} i_{sq}^2(t) dt}, \quad (2.5),$$

де $q = a, b, c$ – позначення фаз двигуна: А, В, і С відповідно.

Діючі значення струмів ротора I_r

$$I_r = \sqrt{\frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} (i_{rx}^2(t) + i_{ry}^2(t)) dt} \cdot \sqrt{\frac{2}{z_2}}, \quad (2.6)$$

де z_2 – число стрижнів ротора; i_{rx} , i_{ry} – миттєві значення просторових векторів струму ротора по осях x , y .

Блок розрахунку втрат та енергетичних показників включає розрахунок втрат у обмотці статора (P_{ms}) і ротора (P_{mr}), магнітних втрат (P_{cm}), механічних (P_{mex}), додаткових (P_δ), коефіцієнта корисної дії (η) та коефіцієнтів потужності у випадку синусоїдних ($\cos\phi$) та несинусоїдних струмів (k_δ).

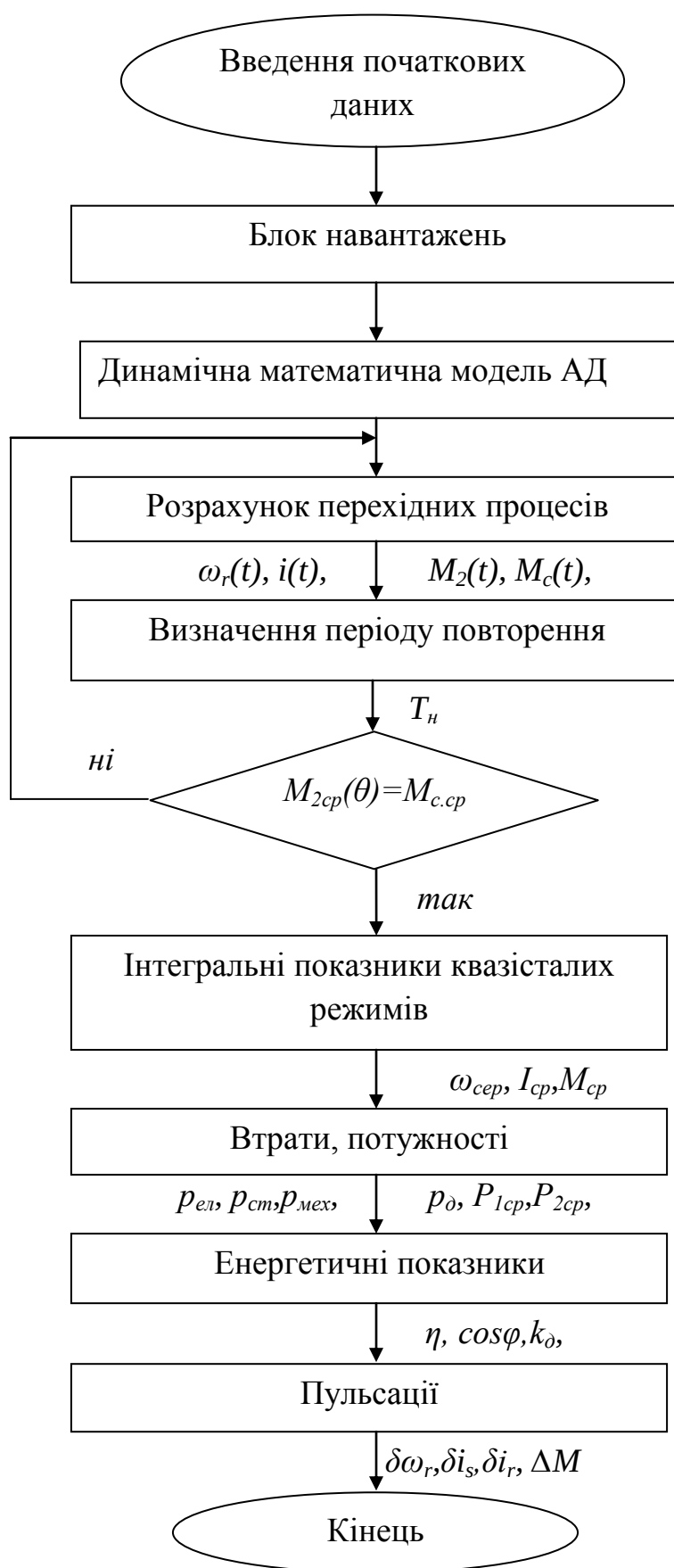


Рис.2.2 Алгоритм розрахунку інтегральних показників АД

Для симетричного трифазного двигуна і симетричної трифазної синусоїдальної напруги й симетричних струмів статора втрати P_{ms} визначаються через діюче значення струму фази I_s у квазісталих режимів

$$P_{ms} = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s. \quad (2.7)$$

Втрати в обмотці ротора:

$$P_{mr} = z_r \cdot I_r^2 \cdot R_c, \quad (2.8)$$

де R_c – опір стрижня ротора.

У випадку несиметрії струмів фаз в симетричному трифазному двигуні з трифазною симетричною напругою, яка виникає при змінному навантаженні, втрати у міді в обмотці статора визначаються як

$$P_{ms} = \frac{1}{T_n} \sum_{k=1}^m \int_t^{t+T_n} R_s i_k^2(t) \cdot dt, \quad (2.9)$$

де R_s – опір фази статора.

Для розрахунку електромагнітних параметрів двигунів використано роботи [49, 100], втрат у сталі – [57, 101, 166].

Розрахунок потужностей:

– корисна потужність P_2 , що дорівнює середньому значенню P_{2cp} потужності на валу $P_2(t)$

$$P_2 = P_{2cp} = \frac{1}{T_n} \int_t^{t+T_n} M_2(t) \cdot \omega_r(t) dt, \quad (2.10)$$

де $M_2(t)$, $\omega_r(t)$ – миттєві значення моменту на валу й частоти обертання ротора;

– потужність, що споживається двигуном P_1 , розраховується як сума корисної потужності та сумарних втрат двигуна

$$P_1 = P_2 + P_{ms} + P_{mr} + P_{cm} + P_{mex} + P_\partial. \quad (2.11)$$

Розрахунок енергетичних показників. Коефіцієнт корисної дії двигунів у квазісталих режимах визначається як відношення середніх значень корисної потужності до потужності, яка споживається

$$\eta = \frac{P_{2\text{сеп}}}{P_{1\text{сеп}}} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} \quad (2.12)$$

або через їх інтегральні вирази

$$\eta = \frac{\int_0^T \omega_r(t) \cdot M_2(t) dt}{\sum_{k=1}^m \int_0^T u_k(t) i_k(t) dt}. \quad (2.13)$$

Для розрахунку коефіцієнта потужності k_∂ у випадку несинусоїдних струмів скористаємось способом, що застосовано у роботах [50, 51, 54]. У відповідності з ним k_∂ розраховується як відношення мінімальної величини струмів ($i_{\min}$), які здатні передати дану активну потужність, до величини даних струмів в режимі роботи, що розглядається:

$$k_\partial = \frac{\sum_{k=1}^m \sqrt{\int_0^T i_{\min k}^2 \cdot dt}}{\sum_{k=1}^m \sqrt{\int_0^T i_k^2 \cdot dt}} \quad (2.14)$$

При з'єднанні фаз статора АД за схемою “зірка”, симетричній трифазній синусоїдальній напрузі й несинусоїдних струмах коефіцієнт потужності електромеханічної системи k_∂ розраховується за формулою

$$k_\partial = \frac{P'_1}{U_\lambda \sqrt{\frac{1}{T_\#} \sum_{k=1}^m \int_t^{t+T_\#} i_k^2(t) dt}}, \quad (2.15)$$

де U_λ – лінійна напруга; P'_1 – потужність, яка споживається фазами двигуна

$$P' = \int_t^{t+T_n} \left(\sum_{k=1}^m u_k(t) \cdot i_k(t) \right) dt. \quad (2.16)$$

Вираз (2.15) запропоновано і обґрунтовано в [53] враховувати при оптимізації ЕМС для перехідних і квазісталих режимів роботи. У випадку синусоїдних струмів із виразів для визначення k_∂ можливо знайти $\cos \varphi$ [50].

Розрахунки пульсацій – ступеня нерівномірності частоти обертання ротора $\delta\omega_r$, відносних пульсацій електромагнітного моменту ΔM , струмів статора й ротора виконуються згідно (1.1-1.3).

Метод аналізу квазісталих режимів АД базується на їх дослідженні за допомогою динамічних ММ з використанням запропонованого алгоритму (рис. 2.2) і визначенні розбіжності результатів розрахунку відносних пульсацій моментів, кутової частоти обертання ротора, струмів статора і ротора, ККД – $\Delta\eta$ двигунів з періодичним і сталим навантаженням (середнє значення періодичного навантаження і сталого моменту опору двигуна однакові $M_{\text{const}} = M_{2\text{cp}}(\theta)$).

2.3 Математична модель оптимального проектування АД в квазісталих режимах

Математична модель представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь електричної рівноваги (В.1, Додаток В) і рівняння механічної рівноваги електроприводу

$$M_e - M_{\text{Mex}} - M_c = J \frac{d\omega_r}{dt}, \quad (2.17)$$

де M_e - електромагнітний момент; M_{Mex} - момент навантаження, що не залежить від кута повороту ротора (від сил тертя, аеродинамічних сил тощо); M_c - момент навантаження, що представлений залежністю $M_c = f(\theta)$ від кута повороту ротора θ .

Кутова частота обертання ротора АД визначається за виразом

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (2.18)$$

Електромагнітний момент АД розраховано як часткову похідну від магнітної коенергії по переміщенню при припущенні рівності магнітної енергії і коенергії [49]

$$M_e = 0.5[i]_t \partial / \partial \theta ([L])[i]. \quad (2.19)$$

У випадку симетрії фаз і симетричної трифазної напруги постійної амплітуди й частоти миттєві значення напруг фаз А, В, С розраховуються за формулами

$$\begin{aligned} u_A &= \sqrt{2} \cdot U_{нф} \cos \omega_0 t; \\ u_B &= \sqrt{2} \cdot U_{нф} \cos \left(\omega_0 t - \frac{2}{3} \pi \right); \\ u_C &= \sqrt{2} \cdot U_{нф} \cos \left(\omega_0 t + \frac{2}{3} \pi \right). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Миттєві значення фазних струмів статора АД представлено

$$\begin{aligned} i_{sa} &= \frac{2}{\sqrt{3}} (i_{sx} \cdot \cos \omega_0 t - i_{sy} \cdot \sin \omega_0 t); \\ i_{sb} &= \frac{2}{\sqrt{3}} [i_{sx} \cdot \cos(\omega_0 t - 120^\circ) - i_{sy} \cdot \sin(\omega_0 t - 120^\circ)]; \\ i_{sc} &= \frac{2}{\sqrt{3}} [i_{sx} \cdot \cos(\omega_0 t + 120^\circ) - i_{sy} \sin(\omega_0 t + 120^\circ)], \end{aligned} \quad (2.21)$$

де i_{sx}, i_{sy} – миттєві значення модуля просторових векторів струму статора по дійсній та уявній осях (х, у відповідно).

Модуль струму короткозамкненого ротора розраховується як

$$i_r = \sqrt{i_{rx}^2(t) + i_{ry}^2(t)} \cdot \sqrt{\frac{2}{Z_r}}. \quad (2.22)$$

Математична модель оптимального проектування АД в квазісталих режимах побудована на основі загальної структури ЕМПЕ для дослідження цих режимів (рис.2.1), яка складається з блоків:

- функції мети (критерія оптимальності), у якості якої може бути обрано інтегральне значення ККД, пульсації частоти обертання, електромагнітних моментів тощо у квазісталих режимах;
- конструктивних параметрів АД (число ефективних провідників у пазу статора, довжини пакета статора, зовнішнього і внутрішнього діаметрів статора тощо);
- обмежень (дані двигунів, що регламентовані стандартами і технічними умовами: кратності пускового, максимального й мінімального моментів і пускового струму, перегрів обмоток статора, пульсації моментів, струмів і частоти обертання ротора тощо);
- оптимізаційних методів розрахунку, в тому числі, методу планування експерименту для отримання аналітичних залежностей функцій мети за зміни обраних параметрів АД з врахуванням періодичного навантаження з подальшим дослідженням їх на екстремум.

В роботі обрано для визначення аналітичних залежностей критеріїв оптимальності складних нелінійних систем (ЕМПЕ зі змінним навантаженням) від їх конструктивних параметрів метод планування експерименту. Математичний апарат МПЕ ефективний як при розв'язку задач апроксимації, так і для аналізу, синтезу, оптимізації ЕМПЕ. Використано повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 2^n (повний ортогональний план, де n - число факторів) і ортогональний центрально-композиційний план другого порядку (ОЦКП). В останньому, крім центральної точки ($x_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$) використовуються дві додаткові – "зоряні" точки для кожного фактора ($x_i = \pm\alpha, x_j = 0, j \neq i$). Це забезпечує незалежність визначення коефіцієнтів регресії, достатню точність моделі ОЦКП і потребує невеликої кількості експериментів. Загальне число дослідів $N = 2^n + 2n + 1$. Рівняння регресії для ОЦКП має вигляд

$$\hat{Y} = f(\bar{x}) = b_o + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (2.23)$$

де $\hat{Y}$ – значення вихідної величини (функція мети); x_i, x_j – значення незалежних змінних (кодованих факторів); n – число факторів; b_o, b_i, b_{ij}, b_{ii} – оцінки коефіцієнтів рівняння регресії, що розраховано завдяки розв’язанню системи лінійних рівнянь у матричній формі [79] за виразом

$$[B] = \left([x^T] \cdot [x] \right)^{-1} \cdot [x^T] \cdot \left[\hat{Y} \right], \quad (2.24)$$

де $[x]$ – прямокутна матриця планування експерименту; $[x^T]$ – транспонована матриця планування; $\left[\hat{Y} \right]$ – матриця-стовпець вихідних змінних.

При дослідженні отриманих аналітичних функцій виду (2.23) на екстремум знаходимо оптимальні конструктивні параметри двигунів, які відповідають обраному критерію оптимальності. Це дозволяє покращити технічні і енергетичні показники вдосконалених АД у квазісталих режимах. Даний підхід представлено у розділі 6.

2.4 Математична модель АД, який навантажено вібратором

В роботі [52] запропонована математична модель приводу вібратора з приєднанням ексцентриків, які розміщені на валу двигуна. Рівняння механічної рівноваги електроприводу відповідає виразу (2.17), де M_c є моментом навантаження від сил інерції й сили від зосередженої неврівноваженої маси ексцентриків m_e , що розміщено на радіусі r . Обертання ексцентриків проходить в площині, яка перпендикулярна земній поверхні. Зміна запасу їх потенційної енергії визначає навантаження асинхронного двигуна

$$M_c = m_e r^2 \frac{d\omega_r}{dt} - mrg \cos \theta, \quad (2.25)$$

де g - прискорення вільного падіння. Його нульове значення відповідає розміщенню зосередженої маси на висоті вісі обертання вала під час руху вниз.

Присутність в диференціальних рівняннях електричної рівноваги кута повороту ротора θ потребує доповнення системи диференціальних рівнянь ще одним рівнянням, що дозволяє визначити його поточне значення. Дане рівняння (2.25) й рівняння механічної рівноваги (2.17), що перетворено з урахуванням (2.19), (2.25), являють собою другу частину повної системи диференціальних рівнянь приводу

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left[\nu \sqrt{0,75z_2} M_{rs\nu} \operatorname{Im} \left(\bar{i}_{rv}^* \bar{i}_{1s} \right) - M_{Mex} + mrg \cos \theta \right] / (J + mr^2), \quad (2.26)$$

Сумісне розв'язання рівнянь (В.1), (2.16) і (2.24) дозволяє отримати часові залежності зміни струмів й частоти обертання та визначити втрати в обмотці статора і ротора двигуна. Для оптимального проектування даної електромеханічної системи необхідно визначати її коефіцієнт корисної дії і коефіцієнт потужності.

Корисну дію вібратора оцінимо за величиною енергії, яка передається до масиву, що обробляється. Маючи часову залежність зміни нормальної сили тиску вібратора на поверхню F і приймаючи, що деформація пропорційна зусиллю, корисну роботу A за період визначимо як інтеграл сили F по переміщенню. В результаті отримаємо вираз

$$A = k(F_{\max}^2 - F_{\min}^2), \quad (2.27)$$

де $F_{\max}, F_{\min}$ - максимальна й мінімальна протягом періоду величини сили тиску вібратора на поверхню; k - коефіцієнт пропорційності. Силу F визначим як різницю повної ваги механізму G і нормальної складової сили інерції ексцентриків, яка визначається як $m \cdot \frac{d(\omega_r \cdot r \cdot \cos \theta)}{dt}$

$$F = G - mr(\cos \theta \frac{d\omega_r}{dt} - \omega_r \sin \theta). \quad (2.28)$$

За результатами розрахунку квазісталих режимів за допомогою рівнянь (В.1), (2.18), (2.26) визначаємо за виразом (2.28) максимальне й мінімальне значення нормальної сили тиску вібратора на поверхню протягом періоду та коефіцієнт корисної дії

$$\eta = k(F_{\max}^2 - F_{\min}^2) / \int_0^T 2 \bar{i}_{1s}^* \bar{u}_{1s} dt, \quad (2.29)$$

В знаменнику стоїть вираз енергії, що споживається із мережі протягом періоду T . Підінтегральний вираз – є активна потужність, що споживається з мережі та визначається через симетричні складові [49, 100] при відсутності нульової складової у даному випадку. Для обчислення абсолютної величини ККД необхідно значення коефіцієнту k , що залежить від властивостей середовища, що обробляється (щебень, цемент тощо).

Коефіцієнт потужності k_ϕ у випадку несинусоїдних струмів розраховується за допомогою способу, що запропоновано у роботах [50, 51]. Спочатку у відповідності з виразом (2.15) розраховуємо його знаменник за результатами розв’язання системи рівнянь (В.1), (2.18), (2.26) з урахуванням виразів для фазних струмів АД по схемі «зірка»: $i_A = 2 \operatorname{Re}(\bar{i}_{1s}) / \sqrt{3}$, $i_B = -\operatorname{Re}(\bar{i}_{1s}) / \sqrt{3} + \operatorname{Im}(\bar{i}_{1s})$, $i_C = -\operatorname{Re}(\bar{i}_{1s}) / \sqrt{3} - \operatorname{Im}(\bar{i}_{1s})$ [49]. Тобто, визначаємо залежності зміни фазних струмів $(i_A(t), i_B(t), i_C(t))$ протягом періоду та з їх допомогою – знаменник виразу (2.15). Потім, визначаємо часові залежності зміни струмів в мережі, в припущенні її нескінченної потужності, при наявності компенсуючих конденсаторів

$$i_{\min,q}(t) = i_q(t) + \omega_0 C U_{mq} \cos(\omega_0 t + \xi_q - \pi / 2), \quad (2.30)$$

де q = позначення фаз А, В, С; U_{mn} - амплітуда напруги фази n ; ξ_n - початкова фаза напруги; C - величина ємності компенсуючих конденсаторів, що підключено паралельно двигуну; $\pi / 2$ – зсув фаз внаслідок наявності конденсатора.

. Значення ємності визначаються в результаті чисельного розрахунку: при варіюванні ємності конденсатора C , розраховуємо залежність (2.30) і чисельник виразу (2.15), обираємо ту величину ємності, при якій чисельник (2.15) має мінімальне значення.

Даний підхід дозволяє оцінити завантаження мережі реактивними струмами при яких завгодно часових залежностях напруг і струмів фаз та одночасно визначити значення ємності компенсуючого конденсатора. Таким чином, запропонована математична модель АД з вібратором, що представлено системою диференціальних рівнянь електричної і механічної рівноваги з врахуванням моменту опору ексцентриків, дозволяє оцінювати його втрати, енергетичні показники (при розрахунку ККД даної системи її корисна робота за період визначається як інтеграл нормальної складової сили тиску вібратора по переміщенню) і проектувати електромеханічну систему з урахуванням взаємного впливу її складових та динамічних властивостей.

2.5 Математична модель електромеханічної системи насосної установки холодного водопостачання з асинхронним двигуном

Математичну модель EMC НУ у системі імітаційного моделювання MATLAB (бібліотека SimPowerSystems) представлено на рис.2.3.

Вона складається з блоків джерела живлення, асинхронного двигуна, характеристик насоса та мережі, призначена для дослідження будинків з довільним числом поверхів [27]. Математична модель EMC з АД при зміні величин напруги і частоти джерела живлення, а також частоти обертання ротора двигуна дозволяє визначити величини його електромагнітного моменту, корисної потужності і втрат. Математична модель насоса за заданою величиною витрат системи водопостачання

і частоти обертання дозволяє визначити напір, корисну потужність і ККД насосу, потужність двигуна і момент на його валу.

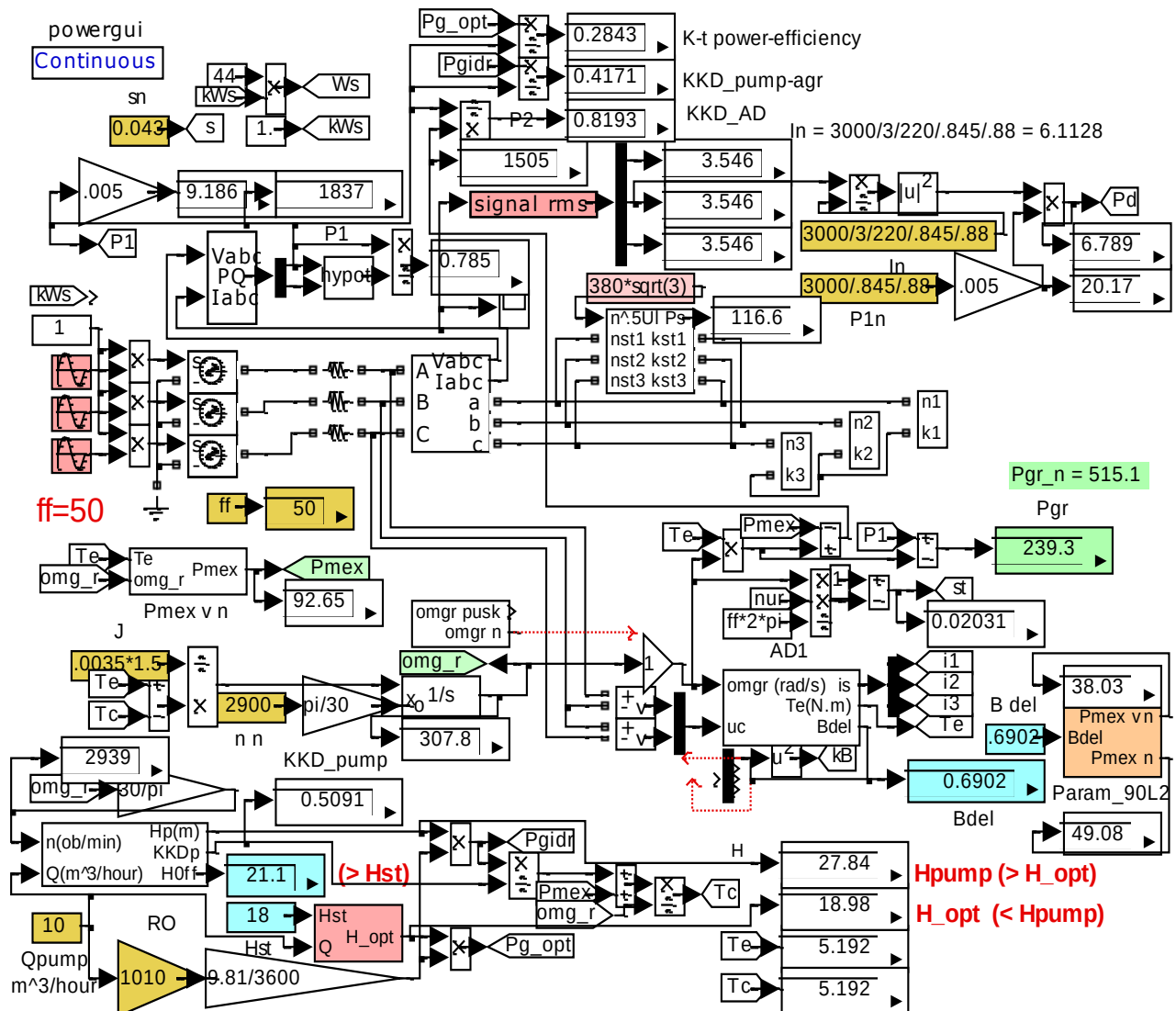


Рис. 2.3 Математична модель ЕМС насосної установки

Припущення та умови дослідження енергоефективних режимів роботи ЕМС НУ багатоповерхових будинків відповідають сталим режимам за зміни подачі, частоти обертання, напруги та частоти живлення, однаковим часовим закономірностям водоспоживання за поверхами, при цьому з'єднання АД з насосом виконується пружною муфтою.

Режими ЕМС НУ, які досліджуються, обумовлюють вимоги до математичної моделі АД. Енергоефективність даної системи оцінюється за сталими режимами

роботи, які можуть досліджуватись за результатами сумісного розв'язку систем статичних рівнянь складових системи. При цьому для забезпечення точності математичного моделювання треба враховувати нелінійні властивості складових системи і зв'язків між ними. Розв'язок статичних рівнянь з нелінійними зв'язками здійснюють за допомогою ітераційних циклів, що часто ускладнюється проблемами їх збіжності. Цих проблем немає при моделюванні об'єкта із нелінійностями параметрів системою диференціальних рівнянь. Така динамічна модель із забезпеченням пошуку усталеного режиму в умовах нелінійності параметрів і зв'язків реалізована у даній роботі і спирається на імітаційну математичну модель асинхронного двигуна електромеханічної системи [155].

У процесі розрахунку за величинами електромагнітного моменту та моменту навантаження АД корегуються його корисна потужність і втрати у підшипниках. За результатами розрахунку режиму роботи АД визначається величина коефіцієнту насичення магнітного кола за основним полем і втрати у сталі.

Структурну модель двигуна (знаходження залежностей зміни струмів за величинами напруги та частоти обертання) представлено блоком *АДІ* імітаційної моделі ЕМС НУ на рис. 2.3. Інтеграція структурної моделі АД до імітаційної моделі системи здійснюється трьома блоками виводів фаз обмотки статора із реалізацією схеми з'єднання «зірка». Для врахування втрат у сталі при моделюванні режиму роботи паралельно АД до його входних клем приєднана система опорів, яка забезпечує втрати у сталі, що визначаються за масою магнітопроводу і величиною питомих втрат у ньому відповідно до відомого виразу

$$P_{cm} = P_{1,50} (f / 50)^{\alpha_1} B_m^2, \quad (2.31)$$

де $P_{1,50}$ – питомі втрати у сталі шихтованого магнітопроводу із стандартною товщиною листів при індукції 1 Тл і частоті 50 Гц; f – частота живлення; α_1 – коефіцієнт, що залежить від марки сталі, величина якого обумовлена співвідношенням втрат на гістерезис (пропорційні частоті перемагнічування, $\alpha_1=1$) і вихрові струми ($\alpha_1=2$); B_m – максимальне в часі і середнє в просторі значення

індукції в магнітопроводі, яке визначається при розрахунку магнітного кола за величиною сумарної МРС машини у даному режимі.

Додаткові втрати у АД прийняті, як 0,5% від номінальної спожитої потужності із корегуванням пропорційно співвідношень квадратів струму режиму і номінального струму.

Втрати у підшипниках залежать від навантаження на них, що обумовлено вагою ротора та радіальним зусиллям, які діють на кінець вала. Максимум втрат спостерігається при однаковому напрямі дії цих двох чинників, мінімум – при їх протилежній дії. Механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за трьома складовими: тертям у підшипниках, втратами у вентиляційному вузлі зовнішнього обдуву та аеродинамічними втратами всередині машини. У формулах визначення втрат на вентиляцію використовується функціональна залежність від розмірів вентилятора та частоти обертання у третьому ступені [10], що відповідає фізиці процесів.

У загальному випадку передавальний механізм впливає на механічні втрати АД, що працюють у складі ЕМС в умовах змінного навантаження, завдяки дії радіальних зусиль муфти на кінець вала двигуна. Оцінімо ступінь цього впливу при сполученні двигуна з приводним механізмом за допомогою пружної муфти на механічні втрати двигуна наступним чином.

Визначаючи радіальне зусилля, що діє на вал двигуна F_n , згідно з [94], при сполученні двигуна з приводним механізмом за допомогою пружної муфти, і припускаючи, що навантаження на підшипники є середнім арифметичним між максимальним та мінімальним його значеннями, втрати в підшипниках можуть бути розраховано за виразом [27]

$$P_n = 3.75 \cdot 10^{-4} \omega_r \left[G_r + (F_n + G_n) \left(1 + \frac{l + 2a}{L} \right) + \left| \frac{G_r}{2} - (F_n - G_n) \left(1 + \frac{l + 2a}{2L} \right) \right| + \left| \frac{G_r}{2} - (F_n - G_n) \frac{l + 2a}{2L} \right| \right], \quad (2.32)$$

де $F_n = P_2 c_n / (\omega_r R_e)$ – радіальні зусилля, які прикладені до середини виступаючого кінця вала і обумовлені реакцією передачі та вагою напівмуфти $G_n = 3.51 \cdot 10^5 d^2 l$, Н; G_r – вага ротора, Н; c_n – коефіцієнт типу передачі (для пружної муфти $c_n = 0.3$, [94]); d – діаметр виступаючого кінця вала, м; R_e – радіус передачі зусилля у муфти, прийнято $R_e = 1.5d$; $P_2 = M_e \omega_r - P_n - P_\beta - P_\delta$; $P_\beta = (P_{\text{мех.н}} - P_{\text{пн}})(\omega_r / \omega_{\text{гн}})^3$ – вентиляційні втрати; $P_{\text{мех.н}}, P_{\text{пн}}, \omega_{\text{гн}}$ – номінальні значення механічних втрат [166], втрат у підшипниках (2.30) при $F_{rk} = 0$ та частоти обертання ротора відповідно; $l, (l + a), L$ – довжина виступаючого кінця вала, відстані від кінця вала до переднього підшипника і між підшипниками [93], м.

Результати моделювання номінального режиму у порівнянні із каталоговими даними для двигуна 4A90L2Y3 наведено у табл.2.1. Розрахунок виконано з наступними даними: коефіцієнт заповнення пакету магнітопроводу сталлю 0,963, коефіцієнт збільшення втрат у сталі 2,5, $p_{1.5,50} = 5,6$ Вт/кг, $\alpha = 1,3$, розрахункова робоча температура 75°C . Досліджено вплив радіальних зусиль муфти на передавальний механізм, що діють на кінець вала АД. Проведено розрахунки згідно виразу (2.32) з врахуванням і без врахування цього чинника. Це дозволило виявити розбіжність у розрахунках механічних втрат і ККД (табл. 2.1) в порівнянні з їх значеннями згідно каталога [93] і методики [166], що складає відповідно 18,3% і 0,8%.

Таблиця 2.1

Результати розрахунку механічних втрат двигуна 4A90L2Y3

Джерело інформації	Номінальні дані двигуна 4A90L2Y3						
	$P_{\text{мех}}$	P_2	I_1	η	$\cos \varphi$	s	B_δ
	Вт	Вт	А	д.о	д.о.	д.о.	Тл
Каталог [93], методика [166]	49,1	3000	6,113	0,845	0,88	0,043	0,68
Математична модель, P_n за (2.32), $F_n = 0$	52,5	2998	6,111	0,841	0,884	0,043	0,67
Математична модель, P_n, F_n за (2.32)	67,4	2983	6,111	0,837	0,8841	0,043	0,665

Характер навантаження насосних установок багатоповерхових житлових будинків змінюється протягом доби згідно добовому графіку водопостачання – часової залежності відносної витрати рідини протягом 24 годин.

Характеристика водопровідної мережі встановлює зв'язок втрат напору у ній із витратами. Особливості водопровідної мережі будинку (рис.2.4) обумовлені зміною її гідравлічного опору за зміни величини напору насосу. Зміна опору залежить від зміни стану кінцевих дроселів – вентилів, ступінь відкривання яких мешканцями визначається потребою у воді і напором мережі.

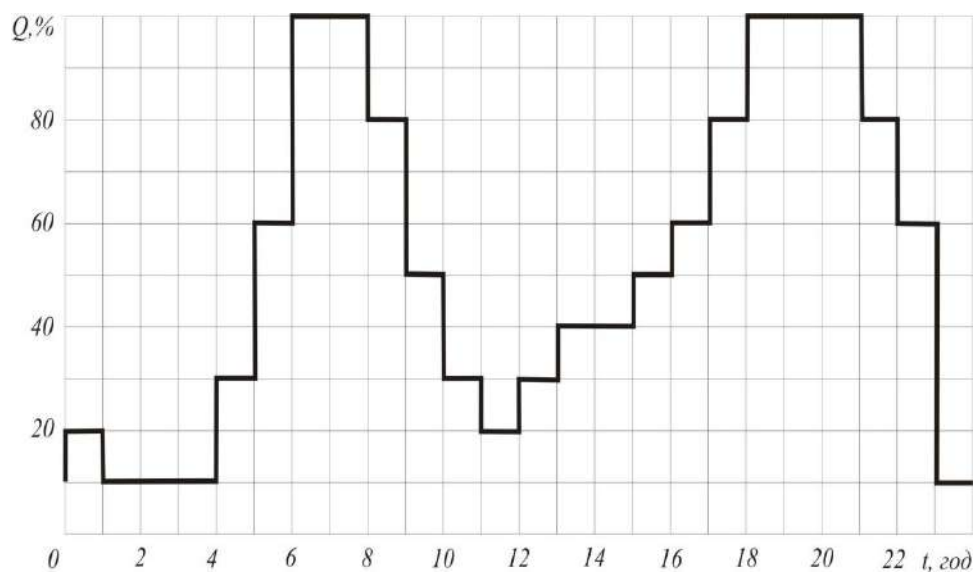


Рис. 2.4 Добовий графік водопостачання багатоповерхового будинку

Мінімальний достатній напір насосу, який забезпечить водопостачання останнього поверху за заданої подачі визначається втратами напору у його мережі із повністю відкритими вентилями і втратами напору у стояку. Запропановано вираз [27] для розрахунку мінімального достатнього напору насосу, який характеризує корисну дію системи водопостачання, за умови однакового водоспоживання за поверхами

$$H_{\min} = \sum_{i=1}^{k_{np}} \left[h_{sti} + R_i \left(Q - Q \frac{i-1}{k_{np}} \right)^2 \right] = H_{st} + Q^2 \frac{1}{k_{np}^2} \sum_{i=1}^k \left[R_i (k_{np} + 1 - i)^2 \right], \quad (2.33)$$

де k_{np} – кількість поверхів; $h_{sti} = 2.7m$, H_{st} – статичний напір i -го поверху та результуючий; Q – продуктивність насосу; R_i – гідравлічний опір ділянки стояку i -го поверху (з урахуванням: для останнього поверху – його трубопроводу; для першого – трубопроводу від стояку до насосу).

Режим роботи насосу однозначно характеризують каталогові експериментальні залежності для напору і ККД та потужності від подачі, які відповідають умовам сталої частоти обертання. Робота насосу, особливо з регульованим електроприводом, супроводжується зміною частоти обертання двигуна, що обов'язково повинно відображатись на характеристиках насосу при математичному моделюванні. Неадекватність моделі стосовно цієї зміни може призводити до похибок до десятків відсотків. В роботі використано результати [204], де аналітично визначено залежності напору і ККД насосу у функції подачі і частоти обертання, спираючись на каталогову інформацію, положення теорії подібності насосів, класичні припущення про розподіл втрат потужності у насосі. Вирази для розрахунку характеристик відцентрового насоса за зміни частоти обертання ротора наведено у Додатку Г.

2.6 Математична модель частото-регульованого асинхронного приводу поршневого одноциліндрового компресору

Комплексне дослідження режимів роботи частото-регульованого АД приводу компресора за періодичної зміни моменту навантаження в залежності від кута повороту ротора обумовлює застосування відповідної математичної моделі розрахунку динамічних режимів. Її розроблено [214] аналогічно моделям ЕМС НУ і моноблочного насоса [156], яка наведена в Додатку Д, в системі імітаційного моделювання (рис. 2.5).

Математична модель доповнена блоками: періодичного навантаження «Мс_1»; розрахунку напруги із зміною частоти живлення «u(f)»; розрахунку відносних пульсацій моменту на валу АД (ΔM); і кутової частоти обертання ротора

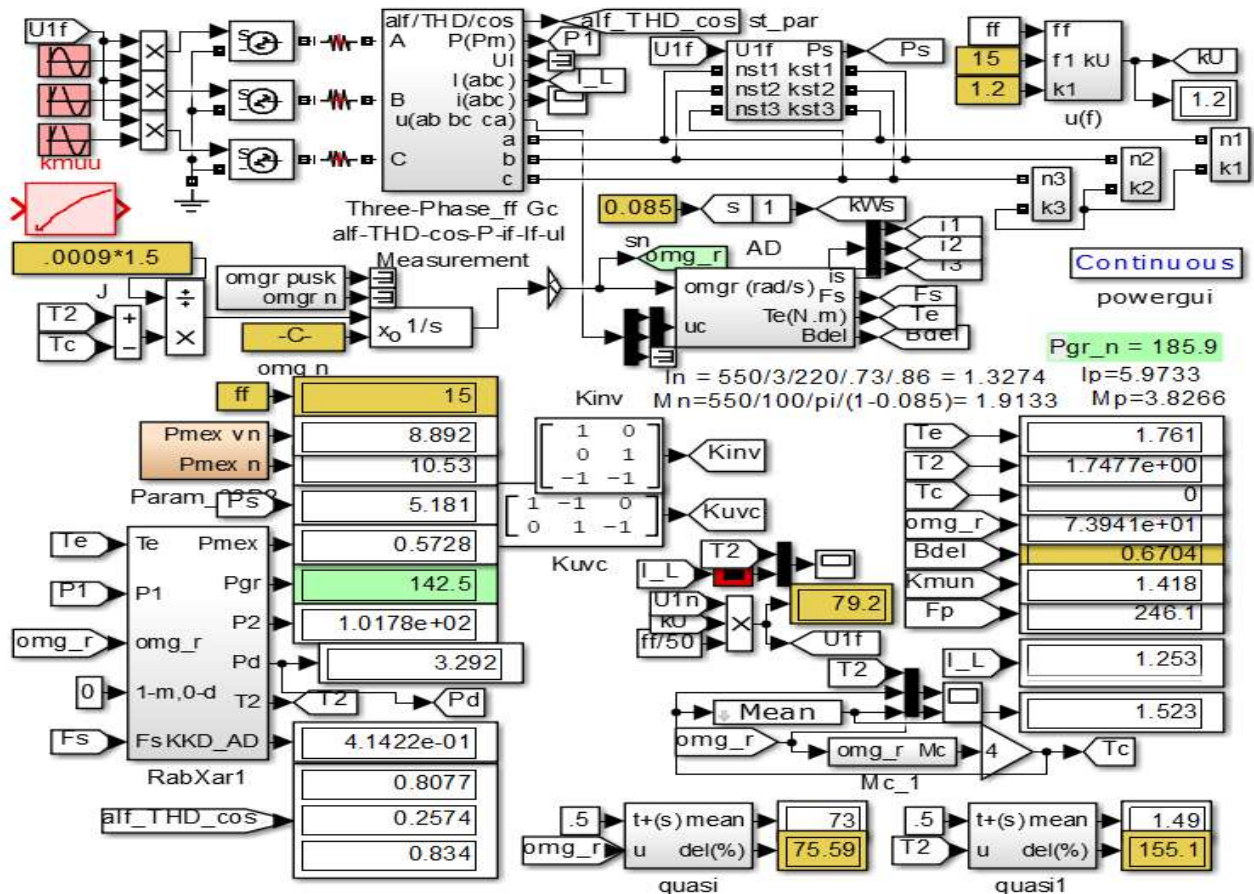


Рис. 2.5 Математична модель частото-регульованого асинхронного приводу поршневого одноциліндрового компресор

($\delta\omega_r$); відхилення середнього ККД квазістального режиму з періодичним навантаженням від ККД режиму із постійним моментом опору на валу АД ($\Delta\eta$).

Чисельний експеримент виконується за алгоритмом:

1) для кожного обраного значення частоти живлення і максимуму залежності $M_c = f(\theta)$ розраховуються диференційні рівняння електричної рівноваги АД і механічної рівноваги за періодичного навантаження;

2) при досягненні умов квазістального режиму визначаються величини критеріїв ΔM , $\delta\omega_r$, середні значення ККД $\eta_{кв}$, моменту на валу (дорівнює середньому значенню моменту навантаження) $M_{2cp}(\theta)$, індукції у повітряному проміжку B_δ і гріючих втрат у АД (сума втрат в міді, сталі і додаткових) для контролю теплового стану порівнянням із номінальним режимом (табл.2.2);

3) розраховується усталений режим роботи за сталого моменту опору $M_{2c} = M_{2cp}(\theta)$ і визначається відповідний ККД η_c ; 4) визначається різниця ККД для сталого і періодичного навантажень $\Delta\eta$.

На рис. 2.5 наведено математичну модель трифазного дво полюсного АД потужністю 550 Вт 4A63B2Y3 для умов частотного регульованого приводу поршневого одноциліндрового компресора з результатами розрахунку. При дослідженні електромагнітні параметри визначено, з урахуванням зміни коефіцієнта насичення магнітного поля у функції сумарної МРС машини, аналогічно [156]. Порівняння результатів моделювання номінального режиму двигуна 4A63B2Y3 із каталоговими даними представлено в [214].

Посилання [10, 17, 27, 49 – 54, 59, 81, 89, 91, 99, 100, 146, 154 – 156 166, 204, 214] див. список використаних джерел стор. 275 – 299.

2.7 Висновки до розділу 2

1. Запропоновано загальну структуру математичної моделі для дослідження квазісталих режимів електромеханічних перетворювачів енергії, як складових електромеханічних систем зі змінним навантаженням, яка включає динамічні математичні моделі асинхронних і вентильно - індукторних двигунів, навантаження та базується на методі аналізу квазісталих режимів на основі алгоритму розрахунку інтегральних значень частоти обертання, струмів, моментів та їх відносних пульсацій, втрат, коефіцієнтів корисної дії на періоді повторення – часовому інтервалі збігу максимальних значень електромагнітного моменту і моменту опору. Це дозволяє уточнювати закономірності протікання електромагнітних і електромеханічних процесів двигунів зі змінним навантаженням та підвищити адекватність математичного моделювання квазісталих режимів.

2. Обґрунтовано вибір математичних моделей для уточненого аналізу електромагнітних і електромеханічних процесів асинхронних двигунів із змінним

навантаженням, які враховують просторові гармоніки магніторушійних сил, несиметрію й нелінійність електромагнітних параметрів двигунів, втрати у сталі та особливість схемних рішень обмоток статора. Для дослідження квазісталих режимів в цих математичних моделях враховано особливості навантаження електромеханічної системи, розроблений алгоритм розрахунку інтегральних значень технічних показників двигунів, що дозволяє проводити аналіз робочих режимів за зміни їх конструктивних параметрів, моментів опору та інерції та розробляти заходи покращення їх характеристик для умов змінного навантаження.

3. Розроблено математичну модель оптимального проектування з врахуванням квазісталих режимів трифазних асинхронних двигунів з живленням симетричною трифазною напругою, що дозволяє сформулювати на основі методу планування експерименту залежності критеріїв оцінки ефективності двигунів (ККД тощо) від конструктивних параметрів та визначити їх оптимальні співвідношення.

4. Розроблено комплексну математичну модель насосної установки багатоповерхового будинку, яка реалізує залежності напору і ККД насосу від продуктивності та частоти обертання ротора, зміну електромагнітних параметрів і втрат в АД за зміни частоти і напруги живлення з врахуванням особливості навантаження. Модель враховує зміну мінімального достатнього рівня напору насоса, який відповідає мінімуму втрат енергії у гідравлічних вентилях споживача, що дозволяє дослідити особливості робочих режимів при регулюванні частоти і напруги живлення двигуна з врахуванням нелінійного навантаження та адекватно оцінити енергоефективність насосної установки багатоповерхового будинку.

5. Вперше розроблено комплексну математичну модель для дослідження динамічних режимів АД з перетворювачами частоти із врахуванням періодичного навантаження, нелінійності електромагнітних параметрів, несиметрії та несинусоїдності процесів, що дозволяє проводити уточнений аналіз режимів їх роботи у складі поршневих компресорів за зміни частоти і напруги живлення та завантаження.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МАГНІТНИХ СИСТЕМ І МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВІД ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПРОЕКТУВАННЯ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

3.1 Вимоги до математичних моделей ВІД

Сучасні тенденції розвитку систем проектування ЕМПЕ пов'язані з розширенням області застосування математичного моделювання. Це обумовлено збільшенням вартості фізичного експерименту, зростанням можливостей обчислювальної техніки, збільшенням масштабів малосерійного виробництва, стислими термінами розробки. На даний час оптимальною методологією проектування можна вважати максимально можливе застосування методів математичного моделювання з перевіркою адекватності математичних моделей при співставленні результатів математичного і фізичного експериментів. В той же час, адекватність математичної моделі ЕМПЕ залежить від сукупності факторів, які враховуються.

Розвиток математичних моделей вентильно-індукторних двигунів пов'язаний із різноманіттям конструктивних виконань, складністю комплексних систем та особливістю їх моделювання, розширенням їх використання для ЕМС із змінним навантаженням.

Математичні моделі вентильно-індукторних двигунів повинні враховувати складність і особливість структури та взаємний вплив індукторної машини, комутатора, системи керування, періодичного характеру навантаження. Модель повинна бути придатною для розрахунків основних робочих режимів ЕМПЕ – динамічних та квазістатичних. Для дослідження режимів роботи ВІД формується система диференціальних рівнянь електричної, механічної рівноваги, рівняння стану магнітного кола, алгоритми формування сигналів керування блоком живлення та їх математичний опис, алгоритм розрахунку показників квазістатичних режимів. При цьому враховується нелінійна залежність параметрів системи рівнянь в функції

кутового положення ротора і магнітного стану осердя. Враховується розгалужена структура магнітних та електричних кіл, особливість конструкції комутатора та алгоритмів керування. Результати моделювання отримуються при одночасному врахуванні електромагнітних та механічних перехідних процесів.

Специфіка процесів в ВІД пов'язана з можливістю існування швидкоплинних перехідних процесів внаслідок комутацій як в електричних колах, так і в магнітних. Намагання підвищити адекватність оцінки енергетичних показників ВІД примушує до розроблення методики розрахунку втрат в сталі з врахуванням специфіки цих процесів.

3.2 Етапи та комплексна структура математичного моделювання ВІД, як складових систем із змінним навантаженням

В роботі розвинуто наукові підходи до проектування і математичного моделювання ВІД, як складових систем із змінним навантаженням, що включають концепцію проектування ВІД і комплексні математичні моделі для уточненого дослідження динамічних і квазісталих режимів ВІД за зміни напруги живлення, струму обмеження, кутів комутації і періодичного навантаження електромеханічних систем, методики чисельних експериментів та реалізацію їх у вигляді комплексу програм.

На першому етапі (рис. 3.1) розробляються магнітні системи згідно технічного завдання та проводиться розрахунок їх електромагнітних параметрів методом скінчених елементів. Для визначення конструктивних параметрів ВІД заданої потужності і частоти обертання на етапі попереднього проектування запропоновано методику пропорційного перерахунку (для скорочення часу вибору варіанта), для розробки оптимальної геометрії магнітних систем індукторної машини – метод планування експерименту, для підвищення адекватності оцінки енергетичних показників ВІД – методику розрахунку втрат в сталі з урахуванням особливостей їх магнітних систем, режиму і зміни параметрів магнітного поля. Вхідними даними для розв'язання польової задачі є головні розміри і геометрія зубцевої зони ВІД, крива

намагнічування сталі. Вихідні дані першого етапу – нелінійні залежності потокозчеплення або індуктивності та електромагнітного моменту від струму фази і кута повороту ротора двигунів.

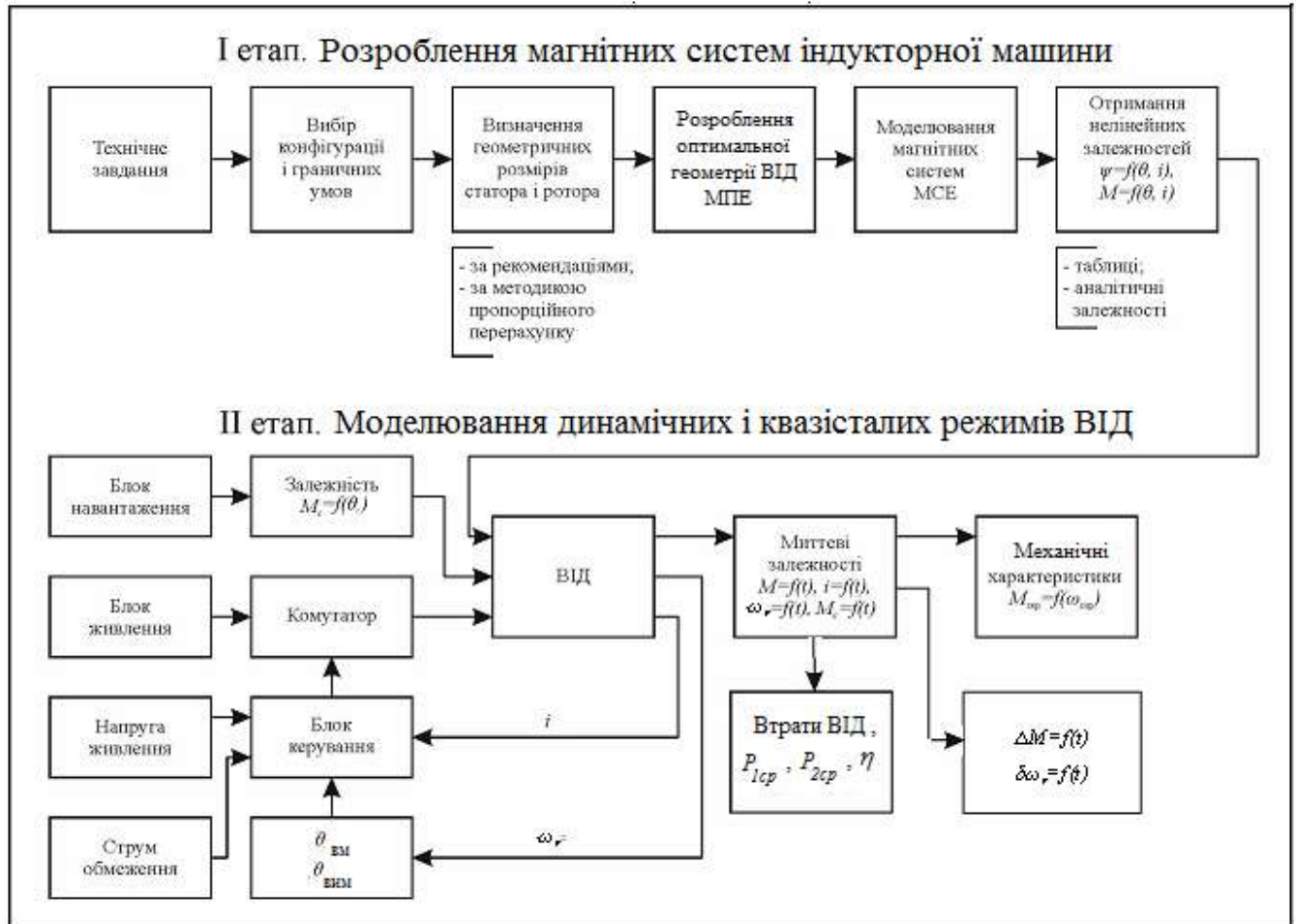


Рис. 3.1 Етапи проектування і математичного моделювання ВІД зі змінним навантаженням

На другому етапі проводиться моделювання динамічних і квазісталих режимів вентильно-індукторних двигунів з врахуванням навантаження конкретного обладнання. Це реалізовано за допомогою комплексних математичних моделей, що складаються з джерела живлення, комутатора, індукторної машини, блоків керування і навантаження, блоків розрахунку інтегральних показників двигунів у квазісталих режимах: струмів, моментів, потужностей, втрат і ККД. В результаті дослідження електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів отримано миттєві часові залежності струмів, моментів, частоти обертання ротора ВІД,

розраховано їх середні значення і пульсації, втрати, ККД згідно загальної структури (рис. 2.1). Це дозволило провести уточнений аналіз динамічних режимів та сформувати ефективні характеристики двигунів за зміни напруги живлення і кутів комутації у складі насосів, компресорів, верстатів-гойдалок з характерним для даного обладнання навантаженням. Результати досліджень ВІД представлено у розділі 5.

Математичні моделі ВІД базуються на диференціальних рівняннях електричних кіл для фазних обмоток і руху електроприводу [104].

Другий закон Кірхгофа для фази в загальному випадку має вигляд

$$u + e = iR, \quad (3.1)$$

де u – напруга мережі; i – значення струму фази; e – ЕРС, що наведена у фазі.

З врахуванням того, що $e = -\frac{d\Psi}{dt}$, напруга

$$u = iR + \frac{d\Psi}{dt}. \quad (3.2)$$

Потокозчеплення фази Ψ_ϕ є функцією струму i та кута повороту ротора θ_ϕ відносно фази статора:

$$\frac{d\Psi_\phi}{dt} = \frac{\partial\Psi_\phi}{\partial i_\phi} \frac{di_\phi}{dt} + \frac{\partial\Psi_\phi}{\partial \theta_\phi} \frac{d\theta_\phi}{dt} = L_\partial \frac{di_\phi}{dt} + \omega_r \frac{\partial\Psi_\phi}{\partial \theta_\phi}, \quad (3.3)$$

де $L_\partial = \frac{\partial\Psi_\phi}{\partial i_\phi}$ – диференціальна індуктивність фази; $\omega_r = \frac{d\theta}{dt}$ – кутова частота

обертання ротора; $L_\partial \frac{di_\phi}{dt}$ – трансформаторна ЕРС, що обумовлена зміною струму у

фазі; $\omega_r \frac{\partial\Psi_\phi}{\partial \theta_\phi}$ – ЕРС обертання, яка пов'язана зі зміною потокозчеплення фази, що

відбувається в результаті взаємного переміщення осердь статора й ротора.

З врахуванням (3.3) рівняння (3.2) можна переписати у вигляді

$$u_\phi = i_\phi R_\phi + L_\partial \frac{di_\phi}{dt} + \omega_r \frac{\partial\Psi_\phi}{\partial \theta_\phi}. \quad (3.4)$$

Електромагнітний момент фази ВІД за зміни коенергії при малому переміщенні (сталому струмі)

$$M_{\phi}(\theta_{\phi}) = \left. \frac{dW_{коен}}{d\theta_{\phi}} \right|_{i=const} \quad (3.5)$$

Вираз для миттєвого електромагнітного моменту через похідну потокозчеплення по куті повороту ротора

$$M_{\phi} = i_{\phi} \frac{\partial \Psi_{\phi}}{\partial \theta_{\phi}}. \quad (3.6)$$

Сумарний електромагнітний момент ВІД

$$M(\theta) = \sum_{i=1}^m M_{\phi i}(\theta_{\phi}), \quad (3.7)$$

де $M_{\phi i}$ – електромагнітний момент від дії однієї фази.

Рівняння руху електроприводу з періодичним навантаженням

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^m M_{\phi i}(\theta_{\phi}) - M_c(\theta)}{J}, \quad (3.8)$$

Зв'язок електричного кута повороту ротора ВІД θ з геометричним кутом θ_{ϕ} , який визначає кутовий зсув між взаємодіючими зубцями статора і ротора

$$\theta_{\phi} = \text{mod}\left(\theta, \frac{2\pi}{z_r}\right). \quad (3.9)$$

При розробці математичних моделей ВІД прийнято наступні допущення: комутація фаз одинична симетрична; фази двигунів не мають магнітного зв'язку, силові транзисторні ключі безінерційні; джерело живлення нескінченної потужності (конденсатор на виході випрямляча забезпечує стабільність напруги).

Комплексні математичні моделі представлено структурними імітаційними моделями в середовищі MATLAB – Simulink з використанням окремих блоків бібліотеки SimPowerSystems [199]. У якості вхідних даних використано залежності потокозчеплення фази (або індуктивності) і електромагнітного моменту від кута

повороту ротора і струму фази, що розраховані на основі енергетичного або польового методів, напругу джерела постійного струму, кути вмикання та вимикання, величину струмуобмеження (струм уставки), часову залежність моменту навантаження.

Використано комутатори з С-скиданням та коливальним процесом перетворення енергії та за схемою несиметричного напівмоста. Навантаження представлено для одно - і двоциліндрових поршневих компресорів у вигляді періодичних залежностей моменту опору від кута повороту ротора двигунів $M_c = f(\theta)$, насосів – у вигляді залежностей згідно (2.1) і рис. 2.4. Розв’язок системи рівнянь (3.4), (3.6 – 3.8) з врахуванням особливостей моменту опору конкретного обладнання дозволяє розрахувати миттєві значення струмів, частоти обертання, втрат, енергетичних показників.

Алгоритм розрахунку показників квазісталих режимів ВІД з врахуванням змінного навантаження відповідає блок-схемі, що наведена на рис.2.1. Інтегральними показниками квазісталих режимів при $M_c = const$ є середні значення електромагнітних моментів й струмів фаз ВІД, потужностей, частоти обертання ротора за період комутації.

Потужність, яка споживається ВІД (без врахування втрат у комутаторі)

$$P_1 = \frac{m}{T_\phi} \int_t^{t+T_\phi} u_\phi \cdot i_\phi dt, \quad (3.10)$$

де u_ϕ , i_ϕ – напруга і струм фази статора; T_ϕ – період роботи фази.

Корисна потужність

$$P_2 = \frac{1}{T_k} \int_t^{t+T_k} (M_e(t) \cdot \omega_r(t) - p_{\text{мех}}) dt, \quad (3.11)$$

де $M_e(t)$, $\omega_r(t)$ - миттєві значення електромагнітного моменту й частоти обертання ротора, T_k – часовий період комутації фази (міжкомутаційний період).

У випадку періодичного навантаження для розрахунку показників квазісталих режимів необхідно визначити період навантаження T_n . Початок розрахунку цих

режимів відповідає умові (п. 2.2), коли середні значення корисного моменту на валу та моменту періодичного навантаження стають рівними. Інтегральні значення моменту опору, частоти обертання, струму фази квазісталих режимів при періодичному навантаженні розраховуються за формулами (2.2 – 2.4) за період зміни моменту опору T_n .

Втрати ВІД включають електричні втрати у обмотці статора (P_{ms}), магнітні втрати у сталі (P_{cm}), механічні (P_{mex}) і в комутаторі (P_k). Втратами в сполучних проводах зневажаємо. Втрати міді у обмотці статора P_{ms} розраховано

$$P_{ms} = I_{s\phi}^2 \cdot R_{\phi}, \quad (3.12)$$

де I_{ϕ} – діюче значення струму фази ВІД для квазісталих режимів.

При послідовному з'єднанні котушок у фазі її опір $R_{\phi} = n_k \cdot R_k$, де n_k, R_k - число та опір однієї котушки.

Механічні втрати в підшипниках можуть бути розраховані з врахуванням радіальних зусиль на кінець валу згідно [166]. При сполученні двигуна з приводним механізмом за допомогою пружної муфти, і припускаючи, що навантаження на підшипники визначається як середнє арифметичне між максимальним та мінімальним, враховуючи [10], розраховуються за виразом (2.30).

Приблизна оцінка магнітних втрат за умови ненасиченої машини проведена на основі відомого підходу [101] за уточненням корегуючих коефіцієнтів, виходячи з наявного досвіду проектування ВІД. При цьому прийнято наступні допущення: сталь анізотропна, магнітна проникність постійна по довжині магнітопроводу, вплив вихрових струмів на криву намагнічування відсутній.

Запропоновано методику розрахунку втрат в сталі, яка враховує несинусоїдний характер розподілу індукції у часі на ділянках магнітної системи ВІД, та базується на використанні [151].

Коефіцієнт корисної дії ВІД визначається за формулою

$$\eta = \frac{\frac{1}{T_k} \int_t^{t+T_k} (M_e(t) - M_{Mex}) \cdot \omega_r(t) dt}{\frac{m}{T_\phi} \cdot \int_t^{t+T_\phi} u_\phi \cdot i_\phi dt} \quad (3.13)$$

Сумарні втрати у ВІД визначаємо як

$$\sum P = P_m + P_{cm} + P_{Mex}. \quad (3.14)$$

Загальний коефіцієнт корисної дії ВІД (з перетворювачем) визначено як відношення корисної потужності двигуна P_2 до потужності P_d , яка споживається системою:

$$\eta_{ЗАГ} = \frac{P_2}{P_d} = \frac{\omega_r \cdot M_c}{U_d \cdot I_d}, \quad (3.15)$$

де U_d, I_d – значення напруги і струму ланки постійного струму відповідно.

3.3 Розроблення магнітних систем ВІД

На етапі попереднього проектування ВІД розроблення їх магнітних систем представлено з використанням: загальних рекомендацій; методики пропорційного перерахунку для визначення конструктивних параметрів двигунів для заданих значень потужності і частоти обертання; комп'ютерного моделювання на основі метода скінчених елементів для визначення оптимальних варіантів ВІД із забезпеченням технічних вимог. Виконаємо моделювання та проведемо аналіз отриманих конструктивних рішень ВІД для герметичних поршневих компресорів.

В роботі розглядаються ВІД базової конфігурації – з співвідношенням числа зубців (полюсів) статора і ротора 6/4.

3.3.1 Розроблення ВІД на основі серійних АД

Методики проектування класичних машин змінного струму базуються на багаторічному досвіді створення таких машин, що зробило ці методики надійною

допомогою при проектуванні та забезпечило високий ступінь відповідності між параметрами технічного завдання на проектування і результатами випробування дослідних і промислових зразків. В основу традиційних методик покладено апробовані рекомендації щодо вибору питомих магнітних і електричних навантажень, а також рекомендації, що пов'язані з визначенням оптимальних співвідношень геометричних розмірів елементів конструкції. Підходи до проектування ВІД і вибору їх головних геометричних розмірів ґрунтуються на загальних положеннях – використанні інженерних методик з застосуванням машинної постійної C_A [84, 105] або модифікованій форми її запису [212] відповідно

$$C_A = \frac{D_r^2 \cdot \ell_\delta \cdot \omega_n}{P_{2n}} = 4 / (\pi \cdot M_\rho) = \frac{4}{\pi M_\rho}, \quad (3.16)$$

де D_r – діаметр ротора; M_ρ – питомий електромагнітний момент.

При розробленні геометрії статора і ротора ВІД на основі серійних асинхронних двигунів (у габаритах АД на номінальну потужність і частоту обертання) при сталих зовнішньому і внутрішньому діаметрах ($D_a = const$, $D_i = const$) визначають довжину машини ℓ_δ за виразом (3.16). На основі рекомендацій [105] обирають значення питомого електромагнітного моменту. За досвідом проектування відношення $\frac{\ell_\delta}{D_r}$ відповідає діапазону 0,5...2,0. Вибір геометричних розмірів зубцевої зони ВІД спирається на рекомендації [84, 103-105]. В результаті аналізу масо-габаритних показників ВІД малої потужності (M_ρ знаходиться в межах 2,5... 7) закритого виконання (для ГПК), які спроектовані у габаритах серійних АД [20, 118] за умови $D_a = const$, $D_i = const$ (табл. 3.1), з'ясовано, що потужність ВІД двигунів збільшується на 15...20 %.

Таблиця 3.1

Конструктивні параметри ВІД, що спроектовані на основі серійних АД

Параметри магнітопроводу, показники ВІД	Геометричні розміри ВІД, які спроектовані у габаритах АД	
	4AA56A4Y3	ДАО
Зовнішній діаметр статора, D_a , мм	89	108
Внутрішній діаметр статора, D_i , мм	55	67
Ширина зубця статора, b_{zs} , мм	14,4	20
Висота зубця статора, h_{zs} , мм	11,3	11,5
Ярмо статора, h_{as} , мм	6,0	9,0
Ширина зубця ротора, b_{zr} , мм	18,64	20
Висота зубця ротора, h_{zr} , мм	10,05	10,7
Ярмо ротора, h_{ar} , мм	18,6	13,5
Величина повітряного зазору, δ , мм	0,25	0,3
Довжина ротора, l , мм	60	40
Потужність, P_n , Вт	140	100
Частота обертання, ω_{rn} , рад/с	157	314

3.3.2 Розроблення ВІД на основі методики пропорційного перерахунку

При розробленні раціональних варіантів вентильно-індукторних двигунів за умови зменшення часових ресурсів на їх пошук вкрай необхідні ефективні у цьому випадку підходи і методики. Для загального вибору електричних машин пропонують нові методики [75] на основі функціональних зв'язків їх параметрів з узагальненим лінійним розміром з використанням каталожних даних.

Для вибору геометричних розмірів статора і ротора, обмоткових даних та електромагнітних параметрів ВІД, які відповідають номінальним значенням потужності і частоті обертання, пропонується методика пропорційного перерахунку [30]. В якості початкової інформації використовується віртуальна модель двигуна, яка умовно приймається за базову. Проектування нового ВІД здійснюється шляхом пропорційного перерахунку базової моделі на нові дані. Ступінь достовірності отриманих результатів багато в чому залежить від того, на скільки параметри нового

двигуна відрізняються від параметрів базисного (момент, потужність, питомі навантаження). При істотній їх різниці результати проектування, що отримано завдяки пропорційному перерахунку, повинні бути скориговані за допомогою електромагнітних розрахунків ВІД.

Основні положення методики пропорційного перерахунку базуються на розгляді енергетичних процесів в фазі вентиляно-індукторних двигунів при їх живленні імпульсами струму прямокутної форми. Початкове положення ротора ВІД відповідає мінімальній індуктивності, коли зубець статора з котушкою розміщений навпроти паза ротора. У цьому положенні ротора потокозчеплення має мінімальне значення $\psi_{\min}$. При зміні кута повороту ротора індуктивність і потокозчеплення контура зростатиме, досягаючи максимального значення $\psi_{\max}$ при узгодженому розташуванні зубця статора і ротора.

При умові $i = \text{const}$ енергія, що поступає від джерела струму, буде

$$W_e = \int_{\psi_{\min}}^{\psi_{\max}} i d\psi = i(\psi_{\max} - \psi_{\min}) = i \cdot \Delta\psi.$$

Енергія, яку затрачує джерело W_e , йде на приріст магнітного поля і на виконання роботи A (або коенергія). Згідно закону збереження енергії

$$W_e = W_M + A.$$

Зміна магнітної енергії пов'язана із зміною потокозчеплення від $\psi_{\min}$ до $\psi_{\max}$:

$W_M = \frac{i\Delta\psi}{2}$, а виконана робота складатиме

$$A = W_e - W_M = \frac{i\Delta\psi}{2}. \quad (3.17)$$

За умови відсутності електричних втрат, енергія, що поступає від джерела струму і пов'язана із зміною його потокозчеплення від $\psi_{\min}$ до $\psi_{\max}$, розподіляється порівну: половина йде на приріст магнітного поля, друга половина – на виконання

роботи. Беручи до уваги те, що величина $\psi_{\max}$ на порядок перевершує $\psi_{\min}$, з достатньою точністю можна записати: $\Delta\psi = 0,9\psi_{\max}$.

Вказана величина роботи (3.17) виконується одним зубцем статора за один цикл перетворення. Цей параметр є основним енергетичним показником машини A , який розраховується як

$$A = 0,45 i_n \psi_{\max},$$

де i_n – номінальний струм котушки.

Таким чином, енергетичний показник визначається як величина роботи, що виконується одним зубцем статора за один цикл перетворення енергії за умови рівності магнітної енергії і коенергії в фазі вентильно-індукторного двигуна при її живленні від джерела постійного струму.

За один оборот ротора ВІД в контурі відбудеться таких z_2 перетворень електричної енергії в механічну роботу. Тоді за один оборот ротора двигуном буде виконана робота

$$A_M = A z_1 z_2.$$

Якщо двигун робить n обертів за секунду, то його потужність і момент дорівнюють:

$$P = A_M \cdot n = \frac{1}{2\pi} A z_1 z_2 \omega_r. \quad (3.18)$$

$$M = \frac{P}{\omega_r} = \frac{1}{2\pi} A z_1 z_2. \quad (3.19)$$

Останній вираз буде використаний при розробці методики проектування ВІД. Розглянемо дві геометрично подібні машини, одна з яких, приймається за базову (позначено літерою “Б”), друга, що розробляється (нова). Момент базового двигуна:

$$M_B = \frac{1}{2\pi} A_B z_1 z_2.$$

Момент нової машини, яка геометрично подібна базовій, розраховується за формулою (3.19). Відношення моментів цих машин дорівнює відношенню їх енергетичних показників

$$\frac{M}{M_B} = \frac{A}{A_B} = \frac{i\psi_{\max}}{i_B\psi_{\max B}}.$$

При однакових значеннях індукції в повітряному проміжку і густині струму, відношення моментів двигунів і енергетичних показників буде пропорційне четвертому степеню лінійних розмірів ВІД. Нехай L – узагальнений лінійний розмір ВІД (діаметр, довжина тощо.). Тоді

$$\frac{M}{M_B} = \frac{A}{A_B} = \left(\frac{L}{L_B}\right)^4; \quad L = L_B \sqrt[4]{\frac{M}{M_B}} = K_L L_B, \quad (3.20)$$

де $K_L = \sqrt[4]{\frac{M}{M_B}}$ – коефіцієнт перерахунку лінійних розмірів (геометрії) ВІД.

Струм котушки і величина повітряного проміжку будуть пропорційні другому степеню лінійних розмірів

$$i = i_B \sqrt{\frac{M}{M_B}} = i_B K_i; \quad \delta = \delta_B \sqrt{\frac{M}{M_B}} = \delta_B K_\delta, \quad (3.21)$$

де $K_i = K_\delta = \sqrt{\frac{M}{M_B}}$ – коефіцієнти перерахунку струму і повітряного проміжку ВІД.

Таким чином можуть бути визначені лінійні розміри нової машини через лінійні розміри базової машини.

Вибір напруги. При живленні ВІД напругою 380В (промислової мережі), остання проходить двократне перетворення. Спочатку напруга перетворюється за допомогою випрямляча в постійну напругу U_d , після чого ця напруга за допомогою комутатора подається на фази ВІД.

Двигуни потужністю до 1 кВт доцільно живити від однофазної мережі. При діючому значенні напруги 220 В на вихідному фільтрі випрямляча $U_d \approx 300$ В. Ця

напруга може бути прийнята як розрахункова для ВІД потужністю до 1 кВт. Двигуни більшої потужності живляться від трифазної мережі напругою 380 В. Після випрямлення цієї напруги за допомогою моста Ларіонова напруга на вихідному фільтрі складатиме 500 В. Таким чином, залежно від мережі розрахункова напруга U_d може мати два значення 300 В або 500 В.

Вибір кількості витків котушки ВІД. Кожна фаза обмотки ВІД містить дві послідовно сполучені котушки, які живляться імпульсами струму прямокутної форми від комутатора. Вказана форма струму забезпечується за рахунок регулювання напруги й введення зворотного зв'язку по струму. Для надійної роботи напруга U_d повинна перевершувати електрорушійну силу ЕРС самоіндукції котушок фази. При послідовному з'єднанні котушок у фазі ВІД, напруга U_d принаймні в два рази має перевищувати ЕРС самоіндукції котушки. Ці умови можуть бути використані для визначення кількості витків в котушці фази.

Ширина зубця статора в радіанах (або кутова величина полюса статора) при його рівнянні міжполюсній відстані дорівнює $\beta_s = \frac{\pi}{z_1}$. При частоті обертання

ротора ω_r зміна потокозчеплення котушки від 0 до $\psi_{\max}$ відбудеться за час $\Delta t = \frac{\beta_s}{\omega_r}$

. Електрорушійна сила (ЕРС) і $\psi_{\max}$ котушки визначається як

$$e = \frac{\Delta \psi}{\Delta t} = \frac{\psi_{\max}}{\beta_s} \omega_r = \frac{U_d}{2}; \quad \psi_{\max} = \frac{U_d \cdot \beta_s}{2\omega_r} \quad (3.22)$$

Потокозчеплення котушки виразимо через потік Φ і витки котушки w_k : $\psi_{\max} = \Phi \cdot w_k$. В одновитковій котушці базового ВІД $\Phi_B = \psi_B$. При однакових значеннях індукцій потік проектованої машини і базової відрізнятимуться пропорційно квадрату лінійних розмірів, тобто $\Phi = \psi_B \cdot \sqrt{\frac{M}{M_B}}$. Потокозчеплення нового двигуна можна виразити через ψ_B

$$\psi_{max} = \psi_B \cdot \sqrt{\frac{M}{M_B}} \cdot w_K = \frac{U_d \cdot \beta_s}{2\omega_r}.$$

$$\text{Звідки } w_K = \frac{U_d \cdot \beta_s}{2\psi_B \omega_r \sqrt{\frac{M}{M_B}}} \cdot \frac{U_d \cdot \beta_s}{2\psi_B \omega_r \sqrt{\frac{M}{M_B}}} \text{ або } w_K = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_d}{\psi_B \omega_r z_1 \sqrt{\frac{M}{M_B}}}. \quad (3.23)$$

Знайдене згідно (3.23) значення w_K є максимально допустимим. Реальне число витків котушки вибирається на 10–20% менше. Після визначення числа витків котушки визначаємо номінальний струм котушки

$$i_n = \frac{i}{w_K}. \quad (3.24)$$

Розрахунок опору котушки. Беручи до уваги, що активний опір провідника пропорційний його довжині і обернено пропорційний до його перетину, в геометрично подібних котушках їх активний опір буде обернено пропорційний до лінійних розмірів

$$r = \frac{1}{K_L} r_B, \quad (3.25)$$

$$\text{де } K_L = \sqrt[4]{\frac{M}{M_A}}.$$

Активний опір багатовиткової котушки

$$r_K = r \cdot w_K^2. \quad (3.26)$$

За допомогою цієї методики розроблено ВІД, який відповідає номінальним значенням потужності 100 Вт і частоти обертання ротора двигуна 3000 об/хв. (табл. 3.2). За базовий варіант було прийнято ВІД базової конфігурації 6/4 з параметрами: $D_a = 151,2$ мм, $D_i = 80$ мм, $l_\delta = 40$ мм, $\delta = 0,4$ мм [30].

Аналіз конструктивних показників і маси сталі розробленого ВІД і серійного асинхронного однофазного двигуна типу ДАО потужністю 100 Вт ($D_a = 124$ мм, $D_i = 67$ мм $l = 34,5$ мм) показав, що при їх проектуванні на одну і ту ж потужність і

Таблиця 3.2

Порівняльний аналіз АД і ВІД потужністю 100 Вт

Показники	Тип двигуна	
	ДАО	ВІД
D_a , мм	0,13 (0,124)	0,08
D_i , мм	0,067	0,0426
l_δ , мм	0,0345	0,04
δ , мм	0,3	0,25
z_1	24	6
z_2	28	4
ω_r , рад/с	313	312,7
P_2 , Вт	100	100
G_{cm} , кг	2,08	0,96
G_s , кг	1,73	0,72
G_R , кг	0,35	0,24

частоту обертання ротора ВІД має менші зовнішній і внутрішній діаметри (на 38% і 26% відповідно) та меншу масу сталі – на 54%.

3.3.3 Розроблення магнітних систем ВІД із забезпеченням максимального середнього електромагнітного моменту

Проведено дослідження впливу зміни діаметру розточування статора D_i та кутових величин полюсів статора β_s і ротора β_r ВІД на величину і характер зміни статичного електромагнітного моменту з метою визначення варіанта двигуна з його максимальним середнім значенням при одиночній симетричній комутації фаз [28]. Моделювання магнітних систем ВІД конфігурації 6/4 виконано в габаритах двигуна AIP90L2 із зовнішнім діаметром статора $D_a = 149$ мм (рис.3.2), діаметром валу ротора – 18 мм, довжиною активної частини машини $l_\delta = 100$ мм, величиною повітряного проміжку $\delta = 0,4$ мм, щільністю струму в обмотках $J = 5,0$ А/мм², коефіцієнтом заповнення паза міддю $k_{zan} = 0,5$, напрузі живлення 400 В. Розрахунки магнітного поля та електромагнітного моменту виконано за допомогою МСЕ

в ліцензійному програмному пакеті INFOLYTICA MAGNET 7.6. Прийнято допущення: ширина зубця статора дорівнює висоті спинки статора $b_{zs} = h_{as}$; кутові величини полюсів статора та ротора однакові $\beta_s = \beta_r$; магнітопроводи статора та ротора виконано зі сталі марки Ст2211; вал ротора – з немагнітного матеріалу з магнітною проникністю $\mu_0 = 1$.

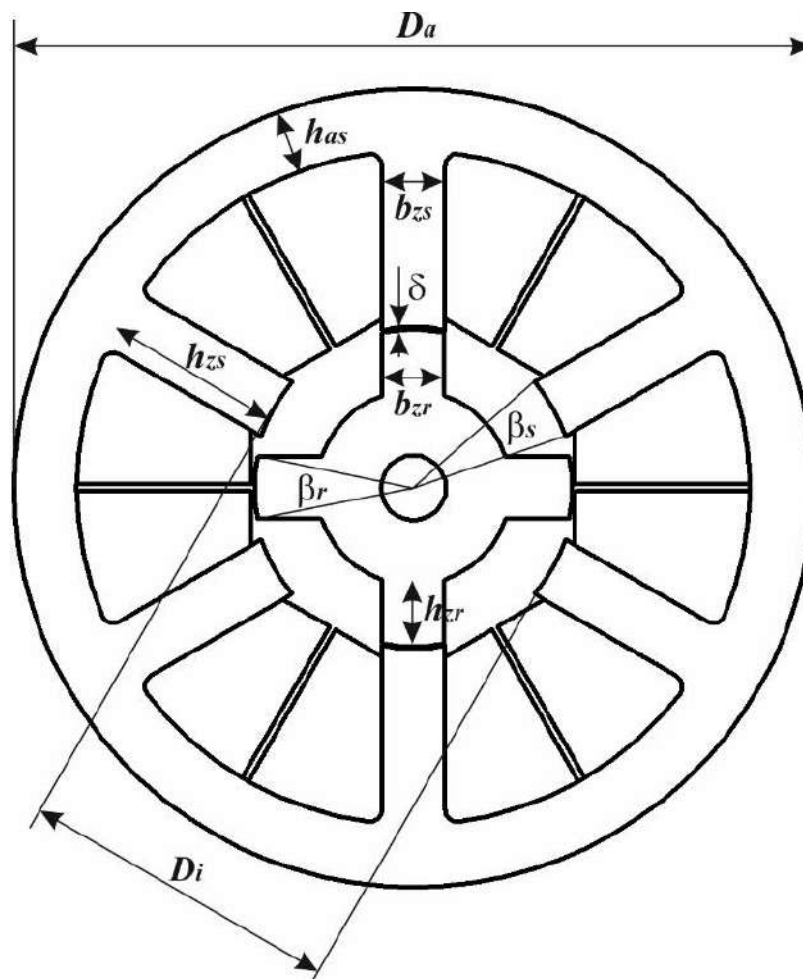


Рис. 3.2 Конфігурація індукторної машини та її основні розміри

Таблиця 3.3

Розміри варіантів магнітних систем ВІД

Варіант	D_i , мм	β_s , град	β_r , град	h_{zs} , мм	b_{zs} , мм	h_{as} , мм	b_{zr} , мм	h_{zr} , мм
1	60	22,5	22,5	32.8	11.7	11.7	11.5	7.85
2	90	22,5	22,5	11.94	17.56	17.56	17.4	10.76
3	60	37,5	37,5	25.46	19.04	19.04	18.78	11.52
4	75	30	30	17.8	19.41	19.41	19.2	10.7

На першому етапі досліджено вірianti магнітних систем (табл 3.3) за зміни D_i та β_s з метою визначення варіанта з геометричними розмірами статора і ротора, що забезпечують максимальне середнє значення електромагнітного моменту в зоні комутації (30° геометричних градусів)

На рис. 3.3 приведено картини магнітного поля та розподіл магнітної індукції (як фон) у перетині магнітопроводу моделей ВІД. Картини магнітного поля відповідають моменту часу, коли включено одну з фаз двигуна, а ротор орієнтовано по осі d . За результатами досліджень визначено: спинка статора для всіх моделей ненасичена ($B_{as} = 1,4$ Тл), зона перекриття полюсів статора та ротора насичена ($B_z = 1,9$ Тл) для варіанта 1. Залежності електромагнітних моментів від кута повороту ротора $M = f(\theta)$ при одиночній комутації фаз приведено на рис. 3.4.

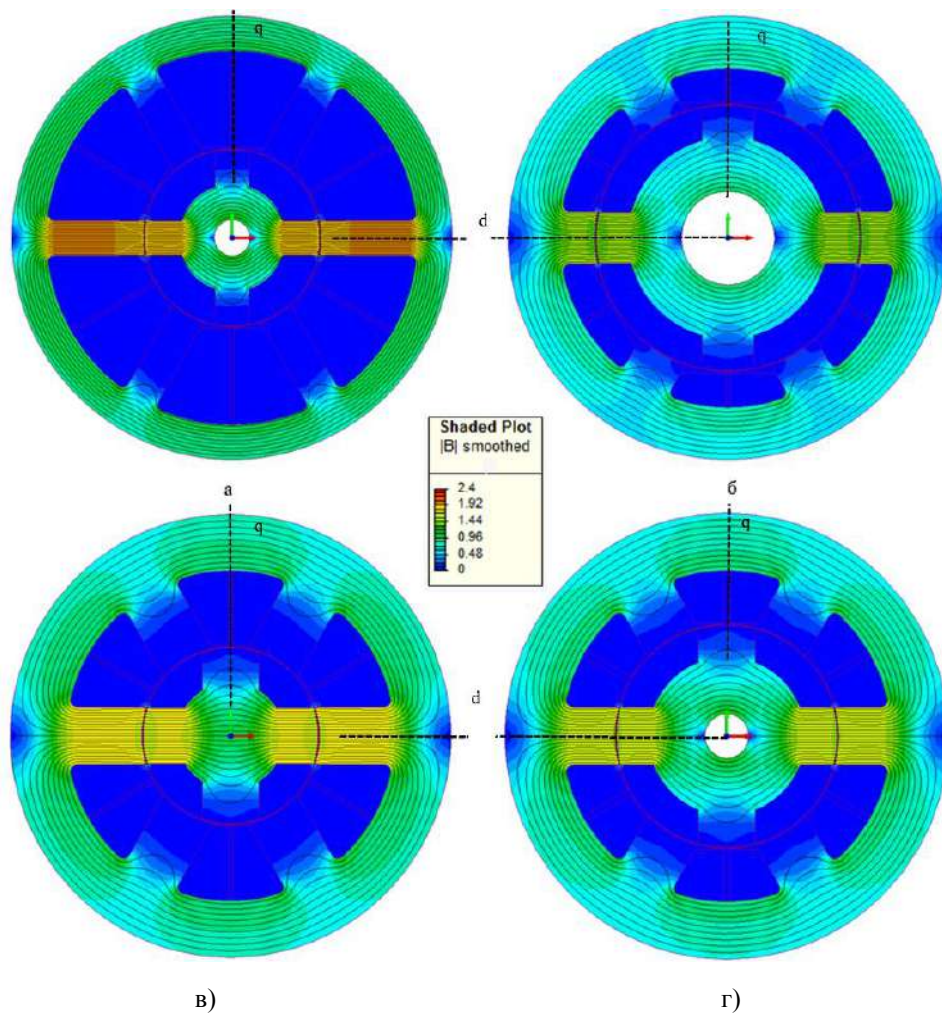


Рис. 3.3 Картини розподілу магнітної індукції ВІД

а) варіант 1, б) варіант 2, в) варіант 3, г) варіант 4

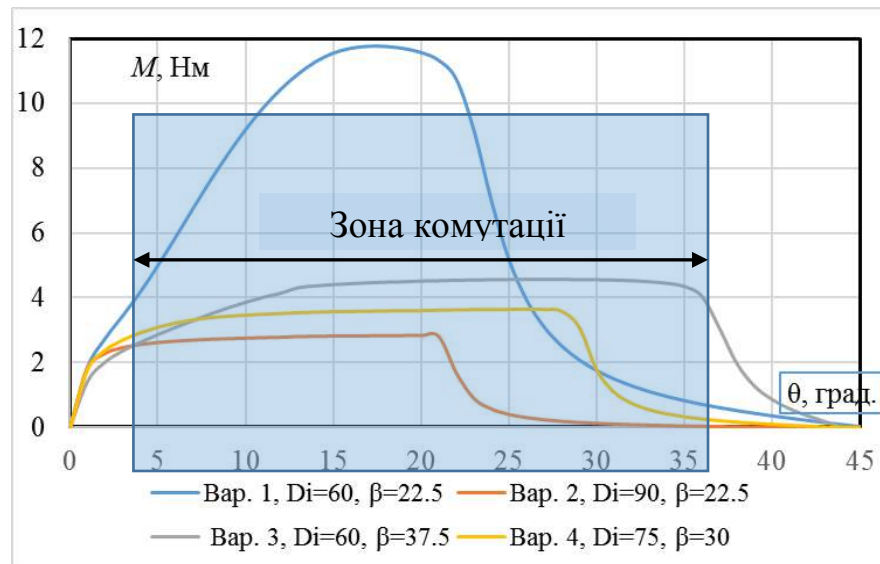


Рис. 3.4 Залежності $M = f(\theta)$ варіантів ВІД за зміни D_i і $\beta_s = \beta_r$

В даному випадку датчики положення ротора можна налаштувати таким чином, що момент вмикання кожної з фаз буде відповідати положенню 8° (рис. 3.4), а момент вимкнення фази – положенню 38° . Визначено середні значення електромагнітних моментів M_{cp} для варіантів: 1– $M_{cp1} = 7$ Нм; 2– $M_{cp2} = 1,68$ Нм; 3 – $M_{cp3} = 4,26$ Нм; 4 – $M_{cp4} = 3$ Нм. Таким чином, найбільше значення M_{cp} отримано для варіанту №1 ($D_i=60$ мм, $\beta_s=22,5^\circ$). З'ясовано, що варіанти №2, №3 і №4 забезпечують зниження пульсацій електромагнітного моменту, однак при цьому середні значення моментів зменшуються в 1,6...4,2 рази.

На другому етапі розглянуто моделі магнітних систем з обраним діаметром $D_i=60$ мм для $\beta_s=22,5^\circ, 30^\circ, 32^\circ, 34^\circ$ і $37,5^\circ$ за умови $\beta_s = \beta_r$. Розраховані відповідні залежності $M = f(\theta)$ показано на рис. 3.5. Обрано варіант № 1.3 з $D_i=60$ мм і $\beta_s = \beta_r = 34^\circ$, що дозволив збільшити значення M_{cp} на 18% (до 8,25 Нм) в порівнянні з варіантом №1 [28]. Встановлено, що за зміни діаметра розточування статора та кутових величин полюсів статора і ротора ВІД можна отримати максимальні середні значення електромагнітних моментів в зоні комутації або зменшити їх пульсації.

Напрямок цих досліджень розвинуто при розробленні оптимальної геометрії статора і ротора ВІД на основі аналітичних залежностей максимального і середнього електромагнітного моментів та його пульсацій від внутрішнього діаметра статора,

кутових величин статора і ротора із забезпеченням заданого середнього електромагнітного моменту з його мінімальними пульсаціями (див. розділ 6).

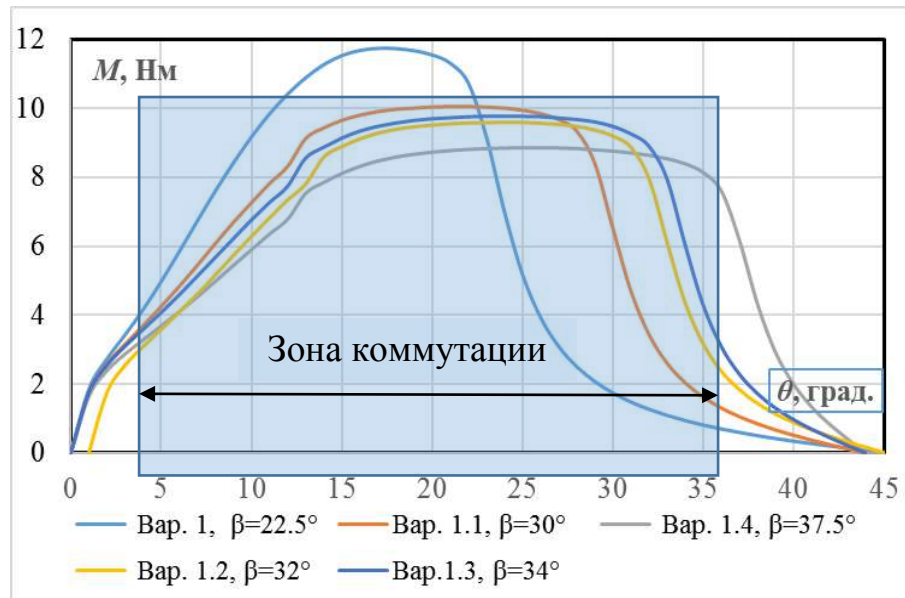


Рис. 3.5 Залежності $M = f(\theta)$ варіантів ВІД при зміні β_s і β_r

3.3.4 Методика розрахунку магнітних втрат в ВІД з врахуванням особливостей магнітної системи, режимів і зміни параметрів магнітного поля

Розроблено методику розрахунку магнітних втрат в ВІД, що базується на часових і просторових залежностях зміни параметрів магнітного поля (індукції і напруженості) в елементах магнітопроводу. Алгоритм методики включає наступні етапи:

а) формування залежності зміни струму котушки в функції кута повороту ротора $i_k = f(\theta)$ чисельним (на основі розв'язання системи диференціальних рівнянь) або експериментальним шляхом;

б) формування розрахункової моделі ВІД, ділянки якого (ярмо і зубці статора та полюси ротора) додатково розбиваються на елементи ($j = 1..k$) з наближеним до рівномірного розподілом в них магнітної індукції;

в) проведення чисельного експерименту при розв'язанні одновимірної польової задачі з використанням МСЕ з врахуванням залежності $i_k = f(\theta)$ для кожного обраного елемента. Розподіл електромагнітного поля досліджується в

площині поперечного перерізу ВІД. Інтервал комутації струму (залежність $i_k = f(\theta)$) поділяється на відрізки ($i = 1..m$). Для кожної ділянки ВІД проводяться розрахунки для всіх миттєвих значень струмів ($i_{k1}...i_{km}$), що відповідають зміні положення ротора ($\theta_1... \theta_m$) за умови постійної частоти обертання двигуна ($\theta_i = \omega \cdot t_i$);

г) формування залежностей середніх індукцій від кута повороту ротора двигуна $B_{cpi} = f(\theta_i)$ для кожної виділеної ділянки магнітопроводу, де

$$B_{cpi} = \sqrt{\int_S B_i^2(\theta_i) dS}. \text{ Формування відповідних часових залежностей } B_{cpi} = f(t);$$

д) розрахунок питомих втрат від вихрових струмів;

Для кожного елемента розраховується ЕРС, що є джерелом електромагнітного поля на поверхні феромагнітного листа, як похідна:

$$E_1 = -\frac{dB_{cp}}{dt}$$

На кожній ділянці проводяться дослідження просторово-часового розподілу магнітного поля в масиві феромагнітного листа за рівнянням електромагнітного поля для плоскої електромагнітної хвилі при її проникненні в товщу листа.

Використовується припущення: у половині товщини листа магнітопроводу, що рівномірно розбита на $N - 1$ вузла з кроком h , магнітна проникність вважається незмінною (N – кількість вузлів одновимірної сітки, що накладено на дослідну область).

В кожному i – му вузлі ($i = 2, ..., N - 1$) рівняння електромагнітного поля для плоскої електромагнітної хвилі при її проникненні в товщу листа в напрямку осі x , що перпендикулярна поверхні, має вигляд

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} = \gamma \operatorname{rot} E,$$

$$\operatorname{rot} E_i = -\frac{\partial B_i}{\partial H_i} \frac{\partial H_i}{\partial t} = -\left[\frac{\partial \mu_i(H_i)}{\partial H_i} H_i + \mu_i(H_i) \right] \frac{\partial H_i}{\partial t} = \mu_{di} \frac{\partial H_i}{\partial t}, \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial^2 H_i}{\partial x^2} = \gamma \mu_{di} \frac{\partial H_i}{\partial t},$$

де H_i – напруженість магнітного поля на поверхні i -го шару; γ – питома провідність сталі; μ_{di} – динамічна (нелінійна) магнітна проникність сталі i -го шару.

Рівняння (3.30) замінюється рівнянням в різницевій формі

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{H_{i+1} - 2H_i + H_{i-1}}{\gamma h^2 \mu_{di}}, \quad (3.31)$$

де h – крок сітки.

Для останнього вузла ($i=N$), вважаючи на граничні умови в середині листа, рівняння (3.31) має вигляд

$$\frac{dH_N}{dt} = \frac{2(H_{N-1} - H_N)}{\gamma h^2 \mu_{dN}}. \quad (3.32)$$

За нелінійної залежності зміни магнітного потоку і умови його рівномірного розподілу в поперечному перерізі листа шихтованого магнітопроводу диференціальне рівняння в першому вузлі формулюється як

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{8H_2 - 7H_1 - H_3 + 6h\gamma E_1}{2\gamma h^2 \mu_{d1}}, \quad (3.33)$$

При розв'язанні диференціальних рівнянь (3.31-3.33) для кожного елементу ярма статора та зубців статора і ротора визначаються часові залежності миттєвих значень напруженості магнітного поля на поверхні листа H_1 і миттєві значення

$$\text{середньої в просторі індукції в листі } B_{cpl} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \mu_{di} * H_i;$$

е) розрахунок питомих втрат активної потужності на кожній ділянці внаслідок впливу вихрових струмів за формулою

$$P_{в.нут} = f \oint H_1 dB_{cpl}. \quad (3.34)$$

Помноживши отримані втрати на об'єм та кількість зубців та ділянок ярма статора отримаємо сумарні втрати від вихрових струмів в сталі магнітопроводу ВІД.

На основі запропонованої методики проведено розрахунок втрат в магнітопроводі ВІД, який розроблено на основі асинхронного двигуна 4AA56Y4 (див. Додаток Е).

3.4 Комплексні математичні моделі ВІД

Розроблено комплексні математичні моделі вентиляно-індукторних двигунів для дослідження робочих режимів, проектування і формування їх характеристик з врахуванням умов експлуатації, розроблення рекомендацій по підвищенню енергоефективності та надійності електромеханічних комплексів. Математичні моделі враховують особливості складових: індукторної машини, комутатора, системи керування, періодичного характеру навантаження та їх взаємний вплив. Математичне моделювання виконано у середовищі MATLAB – Simulink з використанням стандартних блоків бібліотеки SymPowerSystems.

Запропоновано математичні моделі ВІД з використанням регулювання напруги живлення й введення зворотного зв'язку по струму [20, 30], з комутаторами із С-скиданням і коливальним поверненням енергії [118, 119, 124] та за схемою асиметричного моста [22, 121, 124] для дослідження робочих режимів насосного і компресорного обладнання за зміни напруги живлення, кутів комутації та навантаження.

В якості вхідних параметрів використано: залежності потокозчеплення або індуктивності фази від кута повороту ротора і фазного струму $\psi_\phi = f(i_\phi, \theta)$ або $L_\phi = f(i_\phi, \theta)$; напруга ланки постійного струму U_d ; кути вмикання ($\theta_{вм}$) і вимикання ($\theta_{вим}$) фази; струм керування $I_{кер}$.

3.4.1 Математична модель ВІД з використанням методики пропорційного перерахунку

Розроблено імітаційну модель ВІД, що включає блок керування на основі тиристорного перемикача із обмеженням по струму (рис. 3.6) [20, 28], вихідні дані якої (струм, напруга, кількість витків обмотки, опір фази ВІД тощо) визначені на основі методики пропорційного перерахунку. Вказана форма струму ВІД забезпечується за рахунок регулювання напруги й введення зворотного зв'язку по струму.

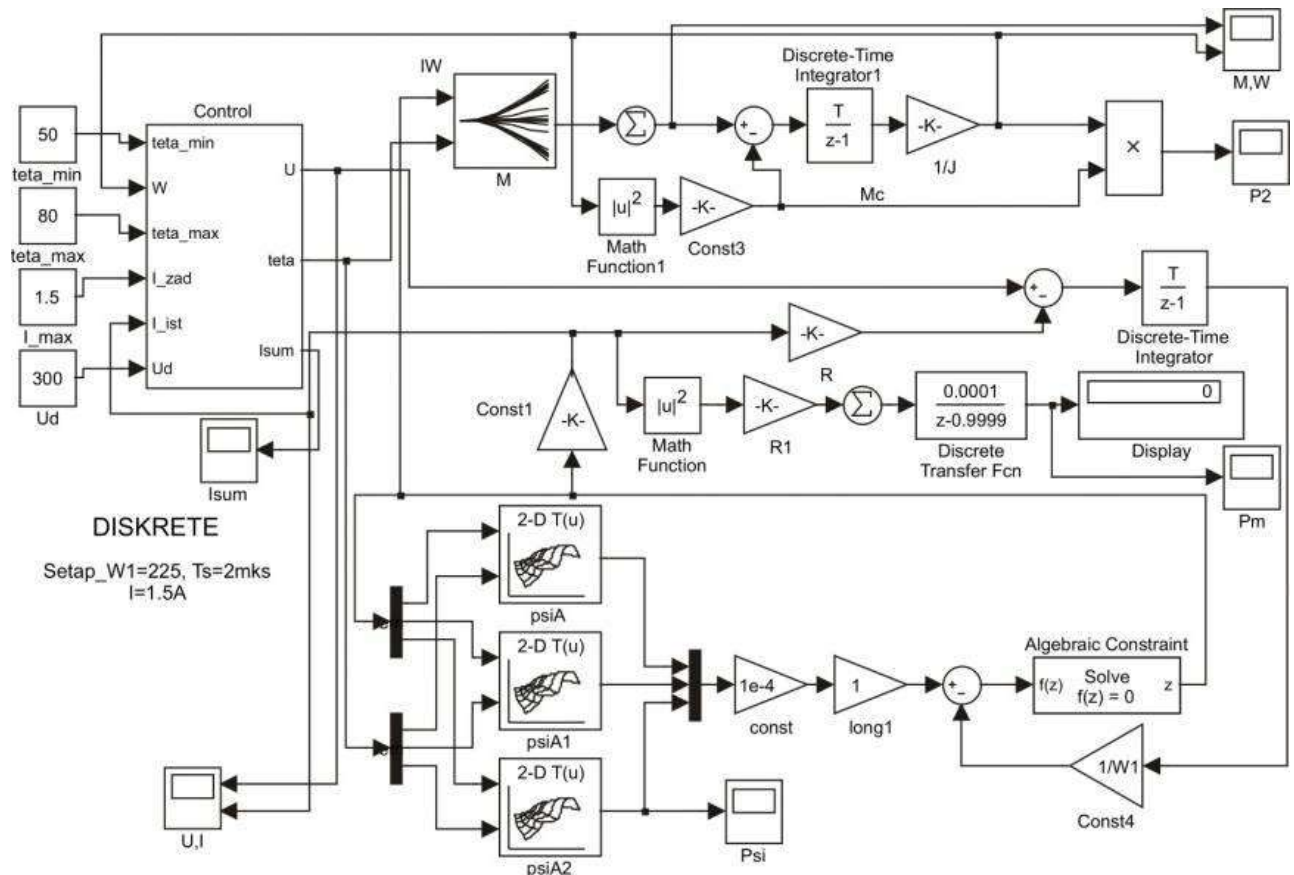


Рис. 3.6 Математична ВІД використанням методу пропорційного перерахунку

Математична модель ВІД дискретного типу, в якій за допомогою алгебраїчного блоку Algebraic Constraint розв'язане рівняння відносно поточкозчеплення фази

$$\psi_{\phi} = \int_t^{t+T} (u_{\phi} - i_{\phi} \cdot R_{\phi}) dt. \quad (3.36)$$

$$\text{Рівняння реалізовано у вигляді: } \sum_{n=1}^3 \psi_{\phi}^* \cdot l \cdot w_{\phi} - \frac{T}{z-1} \left(U - \frac{I}{w_{\phi}} \cdot R_{\phi} \right) = 0,$$

де ψ_{ϕ}^* – потокозчеплення фази для одного витка статора; l – довжина ротора і статора, м; R_{ϕ} – опір фази статора, w_{ϕ} – число витків обмотки статора, I – повний струм (МРС) фази статора, який розраховано як добуток щільності струму j і площі перетину котушки $S_{кат}$ з урахуванням коефіцієнта заповнення міддю $\kappa_{зан}$:

$$I = j \cdot \kappa_{зан} \cdot S_{кат}; \frac{T}{z-1} - \text{дискретний інтегратор.}$$

Опір обмотки фази статора R_{ϕ} , що складається із двох послідовних котушок, розраховано як

$$R_{\phi} = 2R_{75}^* \cdot w_1^2, R_{75}^* = 1,24R_{20}^* = 0,0175 \frac{L}{S_{Мкат}},$$

де R_{75}^* – опір одновиткової фази статора при температурі $75^{\circ}C$; R_{20}^* – опір одного витка фази статора при температурі $20^{\circ}C$; L – довжина витка котушки, м; $S_{Мкат} = S_{кат} \cdot \kappa_{зан}$ – площа міді котушки, $мм^2$. Струм керування фази задовольняє умові $I_{кер} \cdot w_1 \geq 2j \cdot S_{Мкат}$.

Підхід щодо попереднього проектування ВІД на основі методики пропорційного перерахунку включає: розрахунок геометричних розмірів індукторної машини і параметрів обмотки згідно методики пропорційного розрахунку; формування вхідних даних: нелінійних залежностей потокозчеплення для одного витка $\psi_{\phi}^*(i_{\phi}, \theta)$ та електромагнітного моменту фази $M(i_{\phi}, \theta)$ від кута повороту ротора й струму фази, що розраховуються за допомогою МСЕ відповідно розробленої геометрії; дослідження робочих режимів за допомогою запропонованої імітаційної моделі та визначення показників квазісталих режимів [30].

Як приклад ці нелінійні залежності для ВІД з геометричними розмірами $D_a = 108$ мм, $D_i = 67$ мм (табл. 3.1) представлені на рис.3.7 і рис.3.8. Криві 1-7 відповідають різним значенням струмів, причому 1 – мінімальному струмові, а 7 – максимальному. За початкове положення прийнято узгоджене положення зубців статора і ротора, що відповідає максимальній індуктивності. Залежності сформовано

у вигляді двовимірної таблиці у блоці Look-Up Table. Універсальність моделі у тому, що перерахунок $\psi_{\phi}^*(i_{\phi}, \theta)$ для ВІД з заданим числом витків обмотки і довжиною ротора реалізується в інтерактивному режимі.

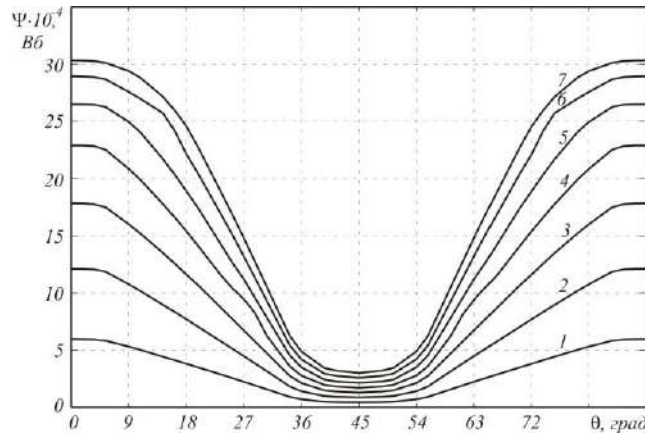


Рис.3.7 Залежності потокозчеплення фази $\psi_{\phi}^*(i_{\phi}, \theta_{\phi})$

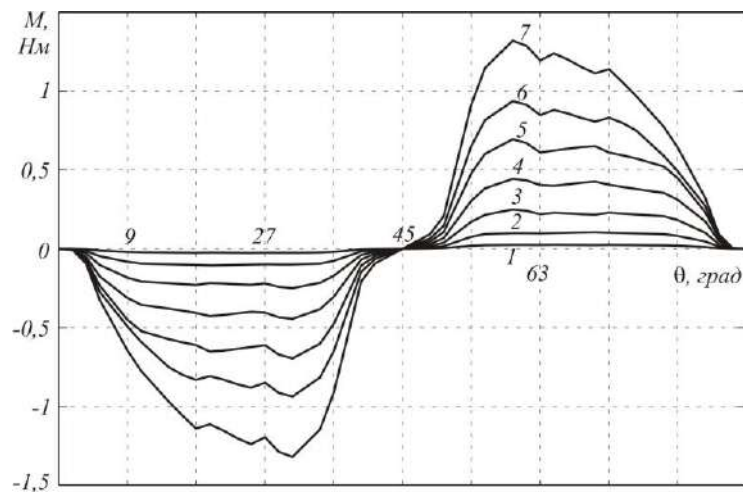


Рис. 3.8 Залежності електромагнітного моменту фази $M_{\phi}(i_{\phi}, \theta_{\phi})$

Підхід щодо попереднього проектування ВІД потужністю 100 Вт і частотою обертання ротора 3000 об/хв з використанням МПП апробований при дослідженні його робочого режиму для моменту навантаження, середнє значення якого $M_{cp} = 0,33$ Нм, за допомогою розробленої імітаційної моделі (рис.3.6). Для напруги ланки постійного струму 300 В, навантаження $M_{cp} = 0,33$ Нм, кута вмикання 50 град ($teta\_min$) і кута вимикання 80 град ($teta\_max$) корисна потужність та частота обертання ротора ВІД відповідають заданим: $P_2 = 102,8$ Вт, $\omega_r = 313$ рад/с (табл. 3.2).

Розглянемо розроблену імітаційну модель схеми комутатора із С-скиданням і коливальним поверненням енергії (рис. 3.10) [119]. Позитивний полюс конденсатора фільтра С5 через амперметр PA1 з'єднано зі спільної точкою фаз ВІД, що з'єднані зіркою. Конденсатор фільтра С5 зашунтований резистором R8 з високим опором для розрядки конденсатора після вимкнення системи від мережі.

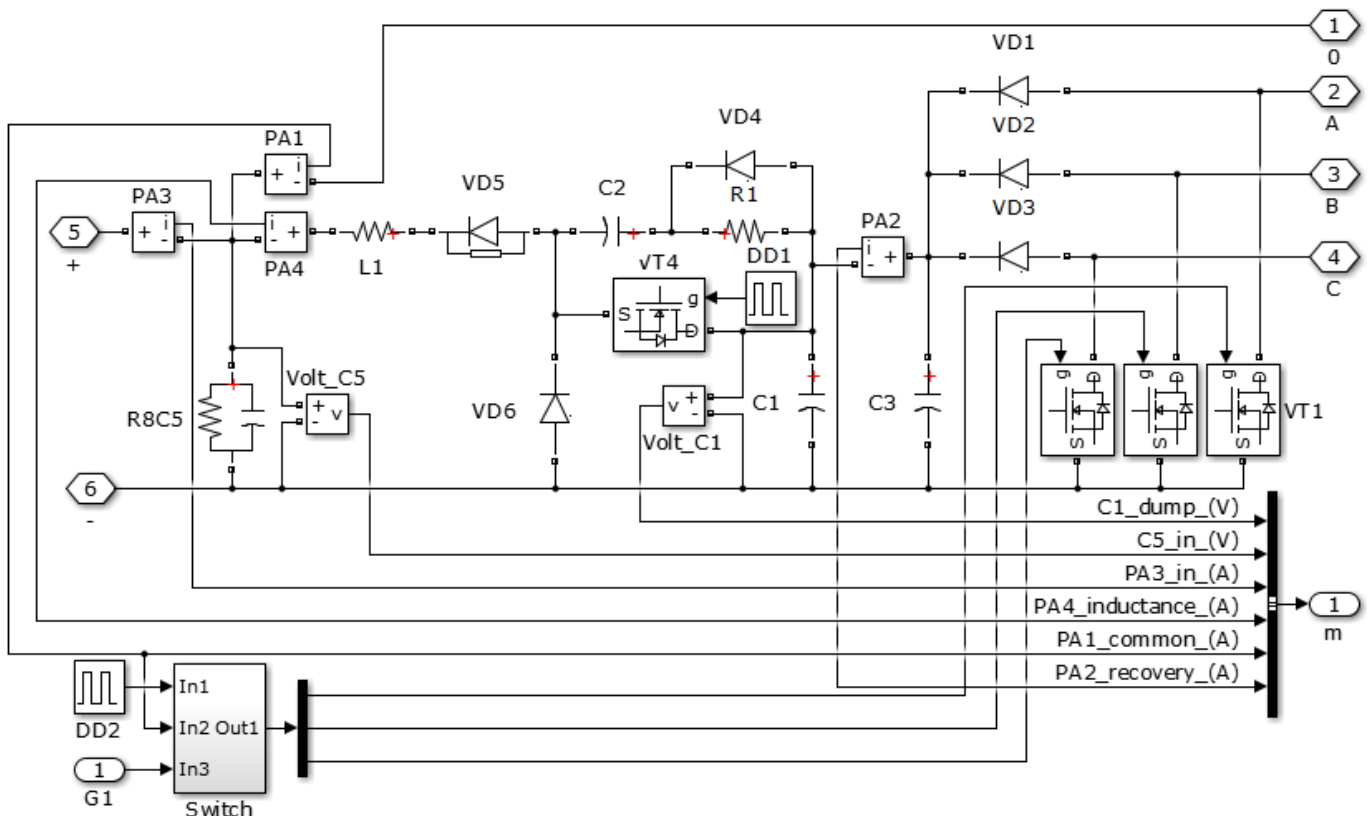


Рис. 3.10 Математична модель комутатора із С-скиданням і коливальним поверненням енергії

Комутатор використовує один силовий ключ (VT1, VT2 або VT3) і один зворотній вентиль (VD1, VD2, або VD3) на кожен фазу та один загальний ключ VT4.

Комутація фаз ВІД здійснюється силовими ключами, завдяки системі керування (блок Switch), яка формує послідовність імпульсів напруги (у залежності від показань датчика положення ротора) та обмежує струм у фазах двигуна.

При вмиканні напруги двигуном споживається енергія з ланки постійного струму. Здійснюється процес наростання струму у фазі по контуру: конденсатор С5

- фаза - силовий ключ (VT1, VT2 або VT3), шунт, конденсатор C5. Рівняння напруги фази має вигляд

$$\frac{d\Psi_{\phi}}{dt} = u_{c5} - i_{\phi} \cdot R_{\phi} \quad (3.37)$$

Згасання струму відбувається по контуру конденсатор фільтра C5 -фаза - зворотний діод (VD1, VD2 або VD3) - конденсатор скидання C1 - конденсатор C5, що описується рівнянням

$$\frac{d\Psi_{\phi}}{dt} = C_1 \frac{du_{C5}}{dt} - C_5 \frac{du_{C1}}{dt} \quad (3.38)$$

Процес зростання струму супроводжується падінням напруги конденсатора фільтра C5. Чим вище напруга на конденсаторі C1, тим швидше знижується струм. Ємність конденсатора скидання C1 обирається у два рази більшою, ніж ємність конденсатора C5.

Через вентилі здійснюється почергове скидання енергії з кожної фази, що накопичена в магнітному полі, на конденсатор скидання C1. Повернення реактивної енергії з конденсатора C1 в коло постійного струму здійснюється ключем VT4, комутація якого реалізується чоперною мікросхемою DD1 (що складається з ключа VT4, високочастотного дроселя L1 та діодів VD5 і VD6) імпульсами частотою 20 кГц. Елементи R1, C2 та VD4 утворюють снабер, який формує безпечну криву вимкнення ключа VT4.

Дана схема забезпечує розряд конденсатора скидання (при відкритті VT4) по контуру C1-VT4-VD5-L1-C5-C1, що характеризує процес перекачування енергії в дросель L1

$$L \frac{di}{dt} = C_1 \frac{du_{C5}}{dt} - C_5 \frac{du_{C1}}{dt} \quad (3.39)$$

та процес скидання енергії (при закритті VT4) із дроселя в конденсатор фільтра C5 по контуру L1-C5-VD6- VD5- L1 за умови U_{C1} більше U_{C5} у два рази. Таким чином, напруга фази підтримується на рівні $u_{\phi} = u_{c1} - u_{c5}$

Імітаційна модель вентиляно-індукторної машини (рис.3.11), що ілюструє систему диференціальних рівнянь (3.40) [119], наведено на рис. 3.11.

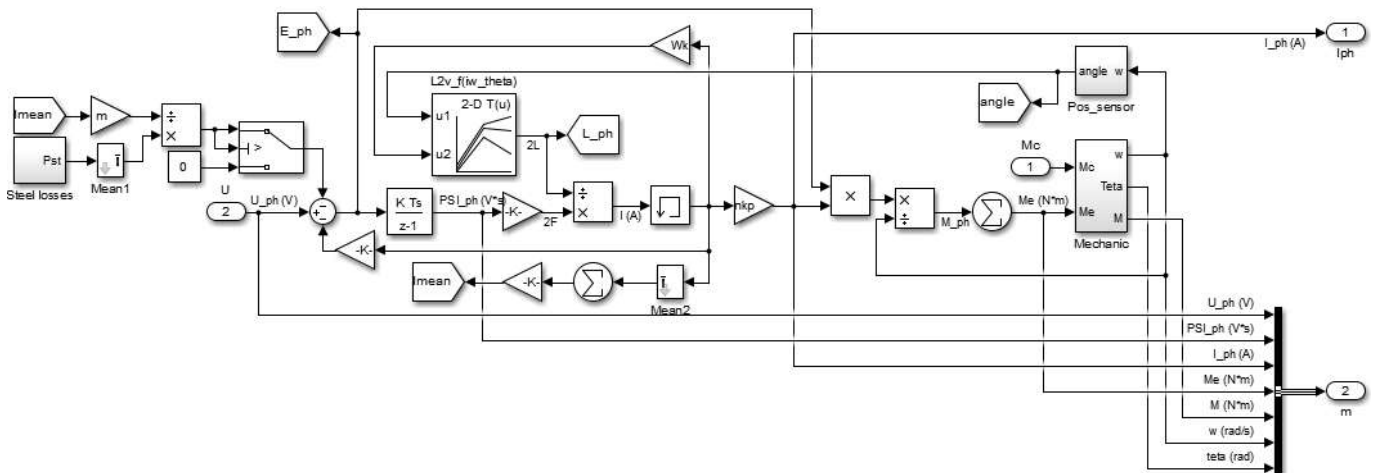


Рис. 3.11 Математична модель ВІД з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{\phi}}{dt} &= u_{\phi} - i_{\phi} \cdot R_{\phi}, \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_c), \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega_r, \end{aligned} \right\} \quad (3.40)$$

Миттєве значення струму фази статора визначається із рівняння $i_{\phi} = \frac{\Psi_{\phi}}{L_{\phi}}$.

Електромагнітний момент M_{ϕ} , утворений однією фазою ВІД

$$M_{\phi} = i_{\phi} \cdot \frac{d\Psi_{\phi}}{dt} \cdot \frac{1}{\omega_r} = i_{\phi} \cdot \frac{d\psi_{\phi}}{d\theta_{\phi}}. \quad (3.41)$$

В блоці (Mechanic) представлено розрахунок механічних втрат з врахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за тертям у підшипниках [166], у блоці (Steel losses) – розрахунок втрат в сталі визначено за експериментом [119] або розраховано згідно [101], а втрати у вентиляційному вузлі зовнішнього обдуву та аеродинамічні втрати всередині машини не враховано.

Коефіцієнт корисної дії ВІД з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії визначається за формулою (3.42) з врахуванням потужності P_{36} в системі повернення енергії

$$\eta_{ВД} = \frac{\omega_r M_c}{P_d - P_{36}}. \quad (3.42).$$

Коефіцієнт корисної дії безпосередньо електричної машини (без перетворювача) розраховується як відношення потужності на валу P_2 до потужності, яка споживається двигуном P_1 . Остання розраховується як сума корисної потужності та сумарних втрат двигуна (3.14). Адекватність ММ оцінена за допомогою порівняння результатів чисельних розрахунків режимів ВІД з експериментальними даними (див. розділ 5).

Математична модель вентильно-індукторного двигуна одноциліндрового поршневого компресора [32] побудована на основі виразу (3.3). Фазний струм визначається з використанням диференційної індуктивності

$$\frac{di_\phi}{dt} = \frac{1}{L_\phi} \left(\frac{d\psi_\phi}{dt} - i_\phi \cdot \omega_r \cdot \frac{\partial L_\phi}{\partial \theta_\phi} \right),$$

де L_ϕ – індуктивність фази статора, яка розрахована МСЕ [119] і представлена у вигляді $L_\phi = f(i_\phi, \theta_\phi)$; $\frac{\partial L_\phi}{\partial \theta_\phi}$ – часткова похідна табличної функції L_ϕ за кутом θ_ϕ .

Електромагнітний момент утворений однією фазою ВІД

$$M_\phi = \frac{1}{2} i_\phi^2 \cdot \frac{\partial L_\phi}{\partial \theta_\phi}.$$

Комутатор за схемою асиметричного моста (рис. 3.12) реалізує функції регулятора напруги за завданням системи керування. Імітаційна модель представлена на рис. 3.13. Блок FTBL реалізує залежності $\psi_\phi = f(i_\phi, \theta)$; TTBL – залежності $M(i_\phi, \theta)$.

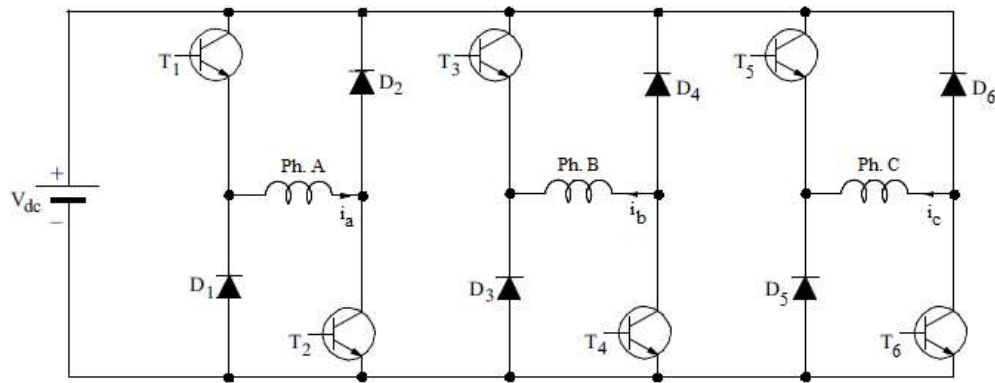


Рис. 3.12 Комутатор за схемою асиметричного моста

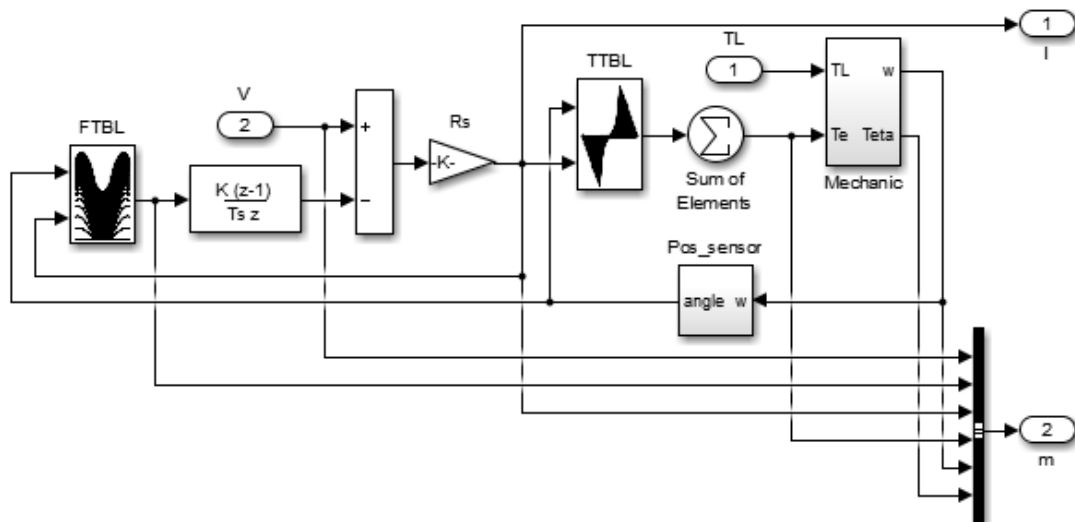


Рис. 3.13 Математична модель ВІД з комутатором
за схемою асиметричного моста

Посилання [20, 23, 28, 30, 32, 75, 84, 101, 104 – 106, 114, 118, 119, 151, 166, 199, 229] див. список використаних джерел стор. 275 – 299.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Запропоновано методику пропорційного перерахунку, яка базується на зв'язку енергетичних показників машин базової і нової, що геометрично їй подібна, з їх лінійними розмірами, числом витків і активним опором обмотки для визначення конструктивних параметрів двигунів заданої потужності. Енергетичний показник

визначається як величина роботи, що виконується одним зубцем статора за один цикл перетворення енергії за умови рівності магнітної енергії і коенергії в фазі ВІД при їх живленні від джерела постійного струму. Даний підхід забезпечує скорочення часу вибору варіантів ВІД на етапі попереднього проектування.

2. Розроблено математичні моделі вентильно-індукторних двигунів, в яких враховується взаємний вплив індукторної машини, комутатора, системи керування, періодичного характеру навантаження, з використанням нелінійних залежностей індуктивності фази статора від струму і кута повороту ротора та розроблених алгоритмів регулювання частоти обертання ВІД, що дозволяє проводити комплексні дослідження робочих режимів двигунів і покращувати їх технічні показники в процесі проектування і експлуатації.

4. На основі запропонованої методики пропорційного перерахунку розроблено ВІД з конфігурацією 6/4 потужністю 100 Вт і частотою обертання ротора двигуна 3000 об/хв. Маса сталі ВІД, у порівнянні з серійним АД такої ж потужності, знижена на 54%. Результати проектування підтверджено дослідженнями робочого режиму двигуна з номінальним навантаженням за допомогою розробленої імітаційної моделі.

5. Для розрахунку втрат у сталі від вихрових струмів в магнітопроводі вентильно-індукторних двигунів запропонована методика, яка, при розв'язанні одновимірної польової задачі, встановлює зв'язок миттєвих значень напруженості магнітного поля на поверхні листа статора та середніх в просторі індукцій в листі для кожного елементу ярма статора та зубців статора і ротора, що дозволяє підвищити адекватність оцінки енергетичних показників.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

В розділі за допомогою удосконалених математичних моделей досліджено режими роботи нерегульованих трифазних і однофазних асинхронних двигунів потужністю 30 Вт...11 кВт з періодичним і пульсуючим навантаженням за зміни конструктивних параметрів, моменту інерції приводу і ємності робочих конденсаторів. За допомогою методу аналізу квазісталих режимів уточнено закономірності зміни часових залежностей струмів, електромагнітних моментів, частоти обертання ротора асинхронних двигунів та розраховано з використанням запропонованого алгоритму їх показники з врахуванням періоду повторення.

З єдиної позиції оцінено розбіжності результатів розрахунків робочих режимів АД з врахуванням характеру навантаження в порівнянні з постійним еквівалентним навантаженням. Для оцінки інтенсивності квазісталих режимів асинхронних двигунів зі змінним навантаженням у розділі сформовано і обґрунтовано відповідний критерій.

Запропоновані математичні засоби у сукупності дозволили обґрунтувати доцільність розроблення заходів з підвищення енергоефективності нерегульованих і частотно-регульованих АД, що працюють з періодичним навантаженням у складі насосів та поршневих компресорів.

4.1 Критерій інтенсивних квазісталих режимів

У загальному випадку, квазісталі режими АД при періодичному моменті навантаження визначаються наявністю електромагнітних і механічних перехідних процесів, характер яких залежить від параметрів як АД, так і навантаження. Для двигунів малої потужності, коли електромагнітна постійна T_E набагато менше

електромеханічної постійної T_{MK} (на порядок і більше), вплив електромагнітних процесів у порівнянні з електромеханічними незначний [111].

Електромагнітна стала T_E визначається як відношення перехідної індуктивності L'_r й активного опору ротора R_r або обернено пропорційна синхронній кутовій частоті обертання ω_1 й критичному ковзанню s_K

$$T_E = \frac{L'_r}{R_r} = \frac{x'_r}{\omega_1 R_r} = \frac{1}{\omega_1 s_K}. \quad (4.1)$$

Електромеханічна стала розраховується в такий спосіб

$$T_{MK} = \frac{J \omega_1 s_K}{2 p M_K}, \quad (4.2)$$

де M_K - критичний момент АД.

Від співвідношення цих постійних залежить якісна картина перехідного процесу. У самому несприятливому (крайньому) випадку можливий резонанс, при якому величина електромагнітного моменту може істотно перевищити величину моменту навантаження, що приводить до перегріву обмоток, підвищених вібрацій, а також до виходу з ладу двигуна. При відсутності резонансу виконується умова [7]:

$$T_{MK} / T_E > 2 \quad (4.3)$$

Істотний прояв електромагнітного перехідного процесу, коли резонансні явища найнебезпечніші, спостерігаються при малих значеннях активного опору ротора (критичного ковзання) або для малого моменту інерції при підвищених значеннях частоти змушених коливань.

Для оцінки визначення необхідності врахування квазісталих режимів при проектуванні АД, що працюють у складі ЕМС з періодичним навантаженням, запропоновано критерій інтенсивних квазісталих режимів [19, 31]. Його величина розраховується як відношення механічної постійної двигуна T_{MK} до електромагнітної T_E

$$k_{kp} = T_{MK} / T_E. \quad (4.4)$$

та характеризує наявність резонансу у межах частотної характеристики двигуна (коли амплітуда електромагнітного моменту M перевищує амплітуду моменту опору M_c ($m = M / M_c > 1$)) при частоті [7]

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{T_{MK}}{2T_E}} \quad (4.5)$$

де ω_p , ω_0 – резонансна частота і частота вільних коливань відповідно.

При відсутності резонансу виконується умова

$$k_{kp} \geq 2. \quad (4.6)$$

Співвідношення (4.6) може бути отримано завдяки вибору моменту інерції електроприводу, числа пар полюсів, критичного моменту АД та опору ротора [7], що впливає на критичне ковзання АД згідно виразу

$$k_{kp} = \frac{J \cdot (\omega_1 \cdot s_k)^2}{2pM_k}. \quad (4.7)$$

Це дозволяє зменшити відношення амплітуд M і M_c відповідно критерію [7]

$$m = \frac{1}{\sqrt{k_{kp} - 0.25 \cdot k_{kp}^2}}. \quad (4.8)$$

Проаналізуємо відрізок серії трифазних АД загальнопромислового призначення потужністю від 90 Вт до 11 кВт, що спроектовані на синхронні частоти обертання 3000, 1500 і 1000 об/хв. Визначимо область дослідження, що становить інтерес з точки зору інтенсивних квазісталих режимів відповідно до критерію k_{kp} . Аналізуючи табл. Ж1 – табл. Ж3 додатку Ж, слід зазначити, що зі збільшенням потужності двигунів знижуються їх критичні ковзання в три-чотири рази в залежності від полюсності двигунів і в сотні разів збільшуються моменти інерції. При розрахунках T_{MK} прийнято момент інерції електроприводу $J = 1,2 \cdot J_p$, де J_p – момент інерції ротора.

Умові (4.6) відповідає низка дво полюсних АД (рис.4.1) з номінальними потужностями 180, 250, 370 і 550 Вт, моментами інерції і критичними ковзаннями відповідно $J = 4,2 \cdot 10^{-4} \dots 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і $s_k = 0,46 \dots 0,55$. Найбільший інтерес для дослідження й аналізу квазісталих режимів із змінним навантаженням представляють двигуни малої потужності 90Вт і 120Вт (відповідно $k_{кр} = 0,53$ і $0,46$) з малими моментами інерції ($2,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) та двигуни у діапазоні потужностей 2,2...11 кВт з малими значеннями критичних ковзань ($s_k = 0,25 \dots 0,15$). Для даного діапазону: значення $k_{кр}$ зменшується від 0,94 до 0,25; моменти інерції приводів збільшуються від декілька сотень до тисячі разів в порівнянні з АД потужності 90 Вт і 120 Вт [31] (табл. Ж.1 Додаток Ж).

Для чотиріполюсних (табл. Ж.2) і шестиполюсних (табл. Ж.3) двигунів (рис.4.2 і рис.4.3) область інтенсивних квазісталих режимів, для якої виконується умова (4.6), співпадає з діапазоном досліджень (від 60 Вт до 11 кВт). Винятком, за відсутності резонансних явищ, є двигуни: чотиріполюсний потужністю 120 Вт ($J = 7 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $s_k = 0,5$, $k_{кр} = 2,71$) і шестиполюсні потужністю 180 Вт і 250 Вт ($k_{кр} = 2,54$ і $2,88$, $s_k = 0,55$ і $0,62$ відповідно), що обумовлено співвідношенням параметрів згідно (4.7).

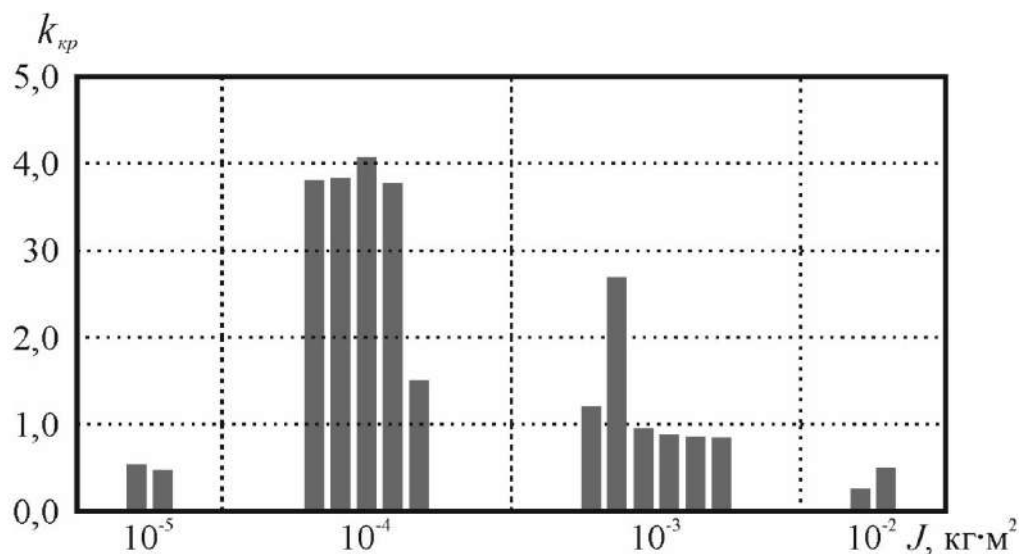


Рис. 4.1 Гістограма залежності $k_{кр} = f(J)$ для дво полюсних АД

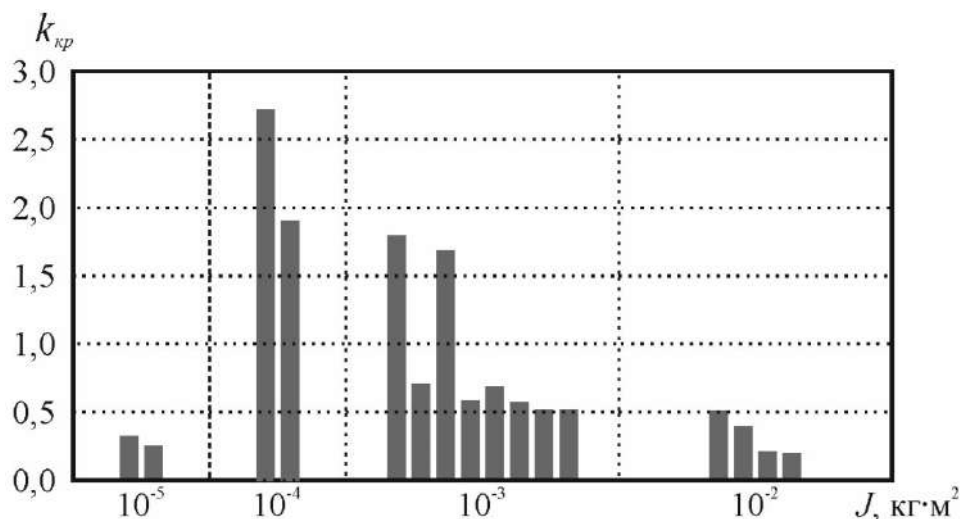


Рис. 4.2 Гістограма залежності $k_{кр} = f(J)$ для чотиріполюсних АД

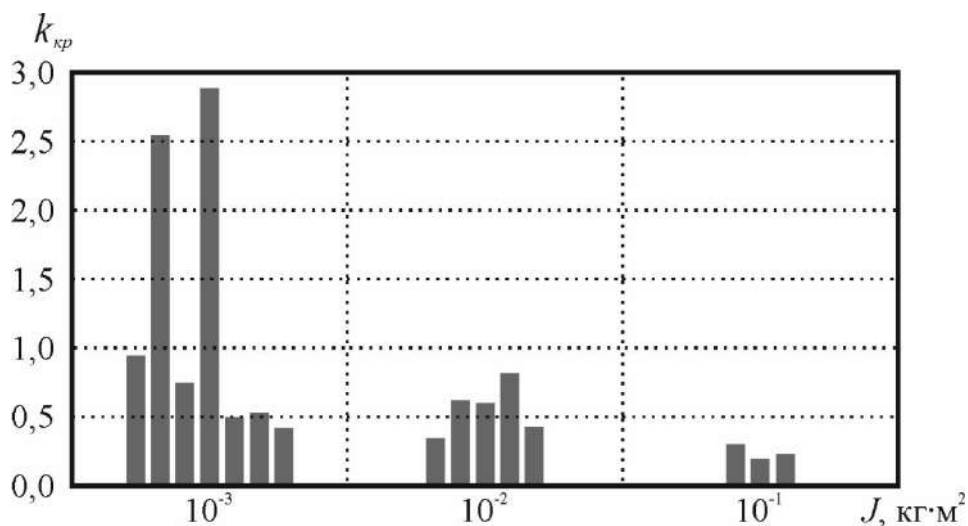


Рис. 4.3 Гістограма залежності $k_{кр} = f(J)$ для шестиполюсних АД

Застосування АД з підвищеним ковзанням (більшим опором ротора) дозволяє поліпшити їх показники і характеристики у квазісталих режимах, що детально досліджено. В даній роботі вплив опору ротора на характеристики і показники квазісталих режимів не розглядається.

4.2 Визначення періоду повторювання для розрахунку показників АД у квазісталих режимах

Використання математичних моделей електромеханічних перетворювачів для дослідження динамічних режимів дозволяє розв'язувати складні завдання їх

розрахунку та оптимізації у складі систем зі змінним навантаження. Як показали дослідження [12, 15, 90, 91] розробку АД приводу компресорів слід виконувати з урахуванням динамічних режимів. Це потребує ретельного підходу до врахування особливостей як електромеханічних перетворювачів, так і електроприводу в цілому.

Важливим є питання оцінки розбіжності, що виникає в розрахунках при заміні квазісталих режимів статичними. Ця задача розглядалась для асинхронного приводу ротаційного компресора потужністю 100 Вт (схема двигуна RSCR – з робочим конденсатором ($C_p = 3,9$ мкФ) і позистором ($R_n = 22$ Ом), що включений паралельно йому [13]). Для адекватної оцінки результатів розрахунків сталого режиму з періодичним навантаженням і порівняння їх з результатами статичного режиму необхідно обрати період повторювання, що впливає на розрахунки показників АД у квазісталих режимах.

Для проведення досліджень статичних та динамічних режимів роботи АД з періодичним навантаженням ротаційного компресора застосовано математичні моделі, що побудовані виходячи з єдиних вихідних положень та мають загальну систему припущень [12]. Момент навантаження двигуна ротаційного компресора M_c є періодичною функцією кута повороту ротора γ , частоти обертання ротора ω_r і тиску у вихідному патрубку пневмомережі. Застосована апроксимація моменту навантаження в залежності від γ та ω_r з урахуванням залежностей $M_c = f(\omega_r, \gamma)$ для номінального тиску, що відповідає сталому режиму роботи і режиму пуску [12].

При розрахунках пускових режимів застосована математична модель позистора, що побудована на основі експериментальних динамічної і струмової характеристик та враховує зміну його опору внаслідок нагріву [91].

Розрахунки показали, що при роботі АД в умовах, які відповідають усталеному режиму (стабільність та симетрія параметрів живлення, електромагнітних параметрів двигуна, а також незмінність моменту навантаження), результати аналізу за допомогою математичної моделі динаміки після затухання перехідних процесів співпадають з результатами аналізу при застосуванні моделі статички за умови нескінченного сумарного моменту інерції ($J = \infty$).

Квазісталі робочі режими є періодичними перехідними процесами внаслідок зміни, в даному випадку, моменту навантаження M_c в функції кута повороту ротора та електромагнітного моменту конденсаторного асинхронного двигуна M у часі з подвійною частотою мережі. Треба відзначити, що частоти зміни M_c і M різняться: M залежить від частоти мережі, а M_c – від частоти обертання ротора. Для квазісталого робочого режиму за допомогою математичного моделювання отримано часові залежності M, ω_r, i_c і визначено період їх повторювання T .

В результаті чисельних розрахунків [13] отримано декілька миттєвих значень часу t_{1i} і t_{2i} , що відповідають співпаданню максимальних значень часових залежностей електромагнітного моменту $M_{\max}$ і моменту навантаження $M_{C\max}$ (розмірність яких у Нм) на початку і кінці періоду повторювання, що позначено у вигляді дробу у табл. 4.1. Для визначених періодів повторювання ($T = 0,12$ с, $T = 0,14$ с) розраховано середні значення електромагнітного моменту M_{cp} , частоти обертання ротора $\omega_{r_{cp}}$ та корисної потужності відповідно за виразами (2.2), (2.3), (2.9).

Таблиця 4.1

Результати розрахунків квазісталіх режимів АД для періодів повторювання

$t_1(M_{\max} / M_{C\max}),$ с, Н · м	$t_2(M_{\max} / M_{C\max})$ с, Н · м	$T,$ с	$\omega_{r_{cp}},$ с ⁻¹	$M_{cp},$ Н · м	$P_{cp},$ Вт
0,111 (0,646/0,656)	0,231 (0,644/0,746)	0,12	301,67	0,395	119,19
0,241 (0,644/0,713)	0,361 (0,643/0,701)	0,12	300,0	0,397	119,13
0,371 (0,642/0,696)	0,511 (0,64/0,646)	0,14	307,14	0,386	118,55
0,662 (0,64/0,725)	0,802 (0,641/0,748)	0,14	307,14	0,388	119,17

Для порівняння результатів математичного моделювання робочого режиму за допомогою математичних моделей статички та квазістатички в якості критерію обрано корисну потужність двигуна. Для розрахунку параметрів робочого режиму за допомогою математичної моделі статички отримано робочу точку на механічній характеристиці двигуна по середньквadratичному моменту $M_{ce} = 0,439$ Н · м.

Розрахункові значення ковзання, частоти обертання в робочий точці та корисна потужність АД відповідно: $s = 0,04$, $\omega_r = 301,4 \text{ рад/с}$, $P_2 = M_{ce} \cdot \omega_r = 132,3 \text{ Вт}$.

Таким чином, виконані дослідження свідчать про розбіжність результатів розрахунку статичних і квазісталих режимів, що знаходиться на рівні 10%. Це підтверджує необхідність розрахунку показників квазісталих режимів з врахуванням періоду повторювання. Отримана розбіжність має місце при квазісталому режимі, коли частота обертання ротора має незначний діапазон коливань. Вагомість результатів при застосуванні математичної моделі динаміки підвищується у випадку режимів, що пов'язані зі значними коливаннями частоти обертання ротора двигунів, поршневих компресорів тощо.

4.3 Підтвердження адекватності математичного моделювання квазісталих режимів АД поршневих компресорів

Підтвердження адекватності математичного моделювання як квазісталих режимів АД з періодичним навантаженням, так і періодичного навантаження поршневого компресора проведено на основі порівняння результатів чисельних розрахунків статичних і квазісталих режимів трифазного асинхронного двигуна АИВ71А2Ф2 потужністю 370Вт ($U_\phi = 220\text{В}$, $p = 1$) з даними його експериментальних досліджень при постійному (на експериментальному стенді) і періодичному навантаженні (у складі поршневих компресорів).

У таблиці 4.2 представлено: номінальні параметри двигуна АИВ71А2Ф2 згідно технічних умов (ТУ) В31.1-14307966-012-2002; експериментальні дані номінального режиму АД, які отримано за допомогою електромагнітного моментомера; результати експериментальних досліджень робочих режимів двигуна у складі двоциліндрових компресорів ВС800 і ВС400 (позначені літерою «Е») згідно протоколу приймальних випробувань (ОАА «Харківхолодмаша»); розрахункові значення показників статичного режиму та квазісталих режимів з постійним і періодичним моментами навантаження.

За допомогою математичної моделі динаміки (див. п. 2.3) при постійному номінальному навантаженні за умови нескінченного сумарного моменту інерції ($J = \infty$) привода досліджено статичний режим. В порівнянні з даними ТУ і експериментальними даними похибки складають: по частоті обертання ротора 4,4%, струму – 13,4%, питомій потужності – 5,4%, ККД – 0,2%. Це дало підставу для проведення подальших чисельних досліджень режимів АД з постійним і пульсуючим навантаженням.

Таблиця 4.2

Результати чисельних і експериментальних досліджень статичних і квазісталих режимів АД двоциліндрового поршневого компресора

Показники АД	Дані ТУ	Експериментальні дані	Розрахунок режиму статики	Результати чисельних розрахунків і експериментальні дані АД у складі компресорів					
				BC800			BC400		
				$M_c = f(\theta)$	$M_c = const$	E	$M_c = f(\theta)$	$M_c = const$	E
$P_2, \text{Вт}$	370	370	370.2	312.7	319.8	317	132.9	151.3	150
$I_s, \text{А}$	0,927	0,938	0.812	0.743	0.741	0.75	0.56	0.57	0.56
$\eta, \%$	80,6	80,3	80.46	79.5	79.96	80.76	70.2	71.58	73.6
$\cos \alpha, \text{в.о}$	0,75	0,746	0.781	0.732	0.732	0.789	0.42	0.447	0.54
$M_{ср}, \text{Н} \cdot \text{м}$	1,24	1,237	1.235	1.036	1.059	1.059	0.45	0.49	0.49
$P_1, \text{Вт}$	459	461	436	393.2	399.9	391.0	198.4	211.3	198
$s, \%$	5,0	4,8	4,59	3,84	3,88	4,7	1,58	1,7	2,0

Часова залежність пульсуючого навантаження відповідає рис. 2.3, його еквівалентне значення (постійний середній момент навантаження за період T у квазісталому режимі) дорівнює $1,036 \text{ Н} \cdot \text{м}$ для агрегату BC800 і $0,45 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – для BC400. Моделювання змінного навантаження проведено виходячи з реальної питомої потужності P_1 двигуна АИВ71А2Ф2 у поршневих компресорах: 393 Вт – у BC800 і 198 Вт – у компресорі BC400. При розрахунках прийнято: момент інерції привода компресора $J = 0,001 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Зіставляючи результати розрахунків усталених режимів при $M_c = f(\theta)$ з даними експериментальних досліджень відмічено кількісну і якісну відповідність, що обумовлено наявністю незначних коливань ковзання (або частоти обертання ротора) для двополюсного двигуна і пульсуючого навантаження у даному випадку. Розбіжність цих результатів склала для ковзання 18,3%, струму – 1,2%, корисної потужності – 1,2%, ККД – 0,7%.

Визначено, що характеристики привода компресора ВС800 з урахуванням змінного навантаження відповідають номінальному режиму АД потужністю 370 Вт. У робочому режимі двигун АІВ71А2Ф2 завантажений на 85,7% від номінального, що обумовлено його проектуванням на дану потужність і частоту обертання. При використанні даного АД для компресора з меншим у два рази моментом навантаження (ВС400), завантаження і ККД двигуна зменшуються відповідно на 38,7% і 7,16%.

Таким чином, використання АД, що спроектовані на задані номінальні значення потужності та постійного навантаження, не раціонально для компресорів з меншими моментами опору, оскільки знижуються енергетичні показники двигунів для даних умов. Це потребує їх розроблення з врахуванням періодичного характеру навантаження або використання регульованого приводу із забезпеченням підвищення енергоефективності режимів роботи АД у складі компресорного обладнання.

4.4 Дослідження впливу моменту інерції на показники квазісталих режимів трифазних шестиполюсних АД потужністю 750 Вт і 11кВт одно- і двоциліндрових поршневих компресорів

Попередні дослідження робочих режимів двополюсного асинхронного двигуна ротаційного компресора потужністю 120 Вт (див. розд.4.2) показали, що розбіжність у результатах чисельних розрахунків, які отримано за допомогою математичних моделей статичної та квазістатичної, становлять 10%. Це є основою для

подовження даних дослідів для АД у діапазоні потужностей, що визначено за допомогою критерію напружених квазісталих режимів $k_{кр}$ (розд. 4.1).

Визначення оцінки впливу періодичного навантаження і моменту інерції на характеристики і показники АД у квазісталих режимах проведено на прикладі дослідження режимів роботи трифазного асинхронного двигуна 4А80А6У3 потужністю 750 Вт ($p=3$, $J_p=0,0031 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) при живленні симетричною трифазною напругою [16]. Використана математична модель, яка розроблена у системі MATLAB – Simulink та представлена у другому розділі. Розглянуто *періодичне* навантаження (характерне для одноциліндрового поршневого компресора, $n_{\text{ц}}=1$) з максимальним моментом $M_{\text{смакс}} = 11 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (рис.4.4), що прикладений на періоді 2π у межах $\frac{7}{9}\pi$ ($\gamma_1 = \frac{2\pi}{9}$; $\gamma_2 = \pi$), $T_H=0,062$ та *пульсуюче* навантаження (характерно для двоциліндрового поршневого компресора, $n_{\text{ц}} = 2$), що представлено розрахунковою діаграмою з косинусоїдною формою імпульсів, $M_{\text{смакс}} = 7,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $T_H = 0,03 \text{ с}$ (рис.4.5).

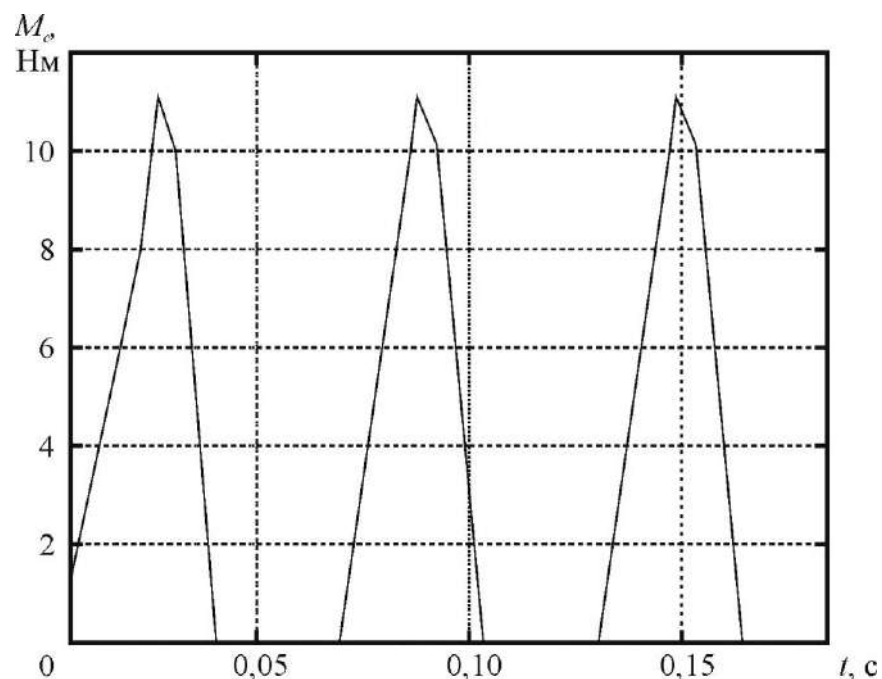


Рис. 4.4 Часова залежність $M_c(t)$ періодичного навантаження

Результати розрахунків діючих струмів, втрат у міді і сталі статора і ротора, корисної та споживаної потужностей, ККД і коефіцієнта потужності АД при

сумарних моментах інерції приводу $J_1 = 1,48 J_p = 0,0046 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ та $J_2 = 5 \cdot J = 0,023 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ при різних типах навантажень, які позначено відповідно 1 – постійне, 2 – пульсуюче, 3 – періодичне, наведено в табл.4.3. Коефіцієнт корисної дії розраховано як відношення корисної потужності P_2 (2.9) до потужності P_1 , яка споживається двигуном і визначається як

$$P_1 = P'_1 + P_{cm} = \int_t^{t+T_n} \left(\sum_1^m u_k(t) \cdot i_k(t) \right) dt + P_{cm},$$

де P'_1 – сума потужностей, що споживаються фазами, за виразом (2.16), P_{cm} – втрати у сталі статора.

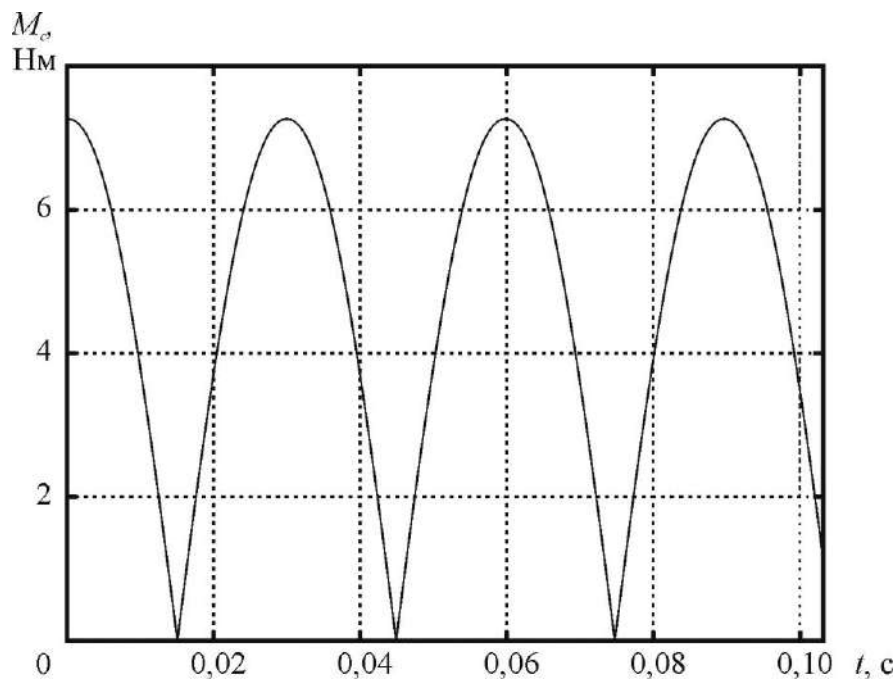


Рис. 4.5 Часова залежність $M_c(t)$ пульсуючого характеру навантаження

За результатами розрахунків встановлено, що розбіжність по корисній потужності при неврахуванні періодичного навантаження одноциліндрового компресора ($n_y=1$) становить 13% та у випадку пульсуючого навантаження двоциліндрового компресора ($n_y=2$) – 6,7%.

Результати розрахунку ступеня нерівномірності обертання $\delta\omega_r$, відносних пульсацій моментів ΔM , струмів статора δi_s й ротора δi_r – табл. 4.4.

Таблиця 4.3.

Результати розрахунків показників двигуна 4A80A6Y3 у квазісталих режимах при різних навантаженнях і моментах інерції

Тип навантаження	$J \cdot 10^{-3}$ кг · м ²	P_2 Вт	I_{sa} I_{sb} I_{sc}	$M_{ссп}$ Н · м	P_{ms} Вт	P_{mr} Вт	P_{cm} Вт	P_1 Вт	α %	η %
1	4,6	338,5	1,422 1,422 1,422	3,33	80,1	10,2	28,6	428,9	48	74,0
2	4,6	315,4	1,935 1,943 1,920	3,33	148,6	50,47	28,59	542	42	58,1
	23	338,4	1,424 1,424 1,424	3,33	80,4	10,34	28,6	429,2	47,8	73,9
3	4,6	295,2	2,347 2,285 2,237	3,34	215,9	92,43	28,56	632,0	39,6	46,7
	23	295,6	1,96 1,906 1,975	3,13	150,3	52,46	28,59	527	38,9	56,08

Таблиця 4.4

Результати розрахунку пульсацій електромагнітних моментів, частоти обертання, струмів двигуна 4A80A6Y3 у квазісталих режимах

Характер навантаження	J , кг · м ²	ΔM , %	$\delta \omega_r$, %	δi_s , %	δi_r , %
$M_c = const$	0,0046	11,86	2,6	5,4	23,9
$M_c = f(\theta), n_u = 2$	0,0046	440	40,6	72,8	137,3
	0,023	4,2	0,9	0,8	4,3
$M_c = f(\theta), n_u = 1$	0,0046	772	81,5	120	193
	0,023	530,4	26,26	46	175

Виявлено значне зниження ККД у квазісталих режимах в порівнянні зі сталим режимом. Відхилення середнього значення ККД з періодичним навантаженням від ККД режиму із постійним моментом опору на валу двигуна, який дорівнює середньому значенню моменту навантаження в квазісталому режимі, для

одноциліндрового компресора $\Delta\eta$ складає 27,3%, двоциліндрового компресора – $\Delta\eta=16\%$.

Оцінити пульсації ΔM і $\delta\omega_r$ у квазісталих режимах дозволяють залежності миттєвих значень $M = f(s)$ у динамічних режимах (динамічні механічні характеристики), які розраховано для одноциліндрового компресора з моментом інерції приводу $J_1 = 0,0046 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (рис. 4.6) і $J_2 = 5J_1 = 0,023 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (рис. 4.7). Показано, що режим АД з періодичним навантаженням $M_c = f(\theta)$ і сумарним моментом інерції $J_1 = 1,48 J_p = 0,0046 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ характеризується значними пульсаціями частоти обертання ротора $\delta\omega_r = 81,5\%$, електромагнітного моменту $\Delta M = 772\%$ та струмів статора $\delta I_s = 120\%$ й ротора $\delta I_r = 193\%$, що приводить до збільшення сумарних втрат у міді статора й ротора в 2,4 рази й, відповідно, до збільшення питомої потужності.

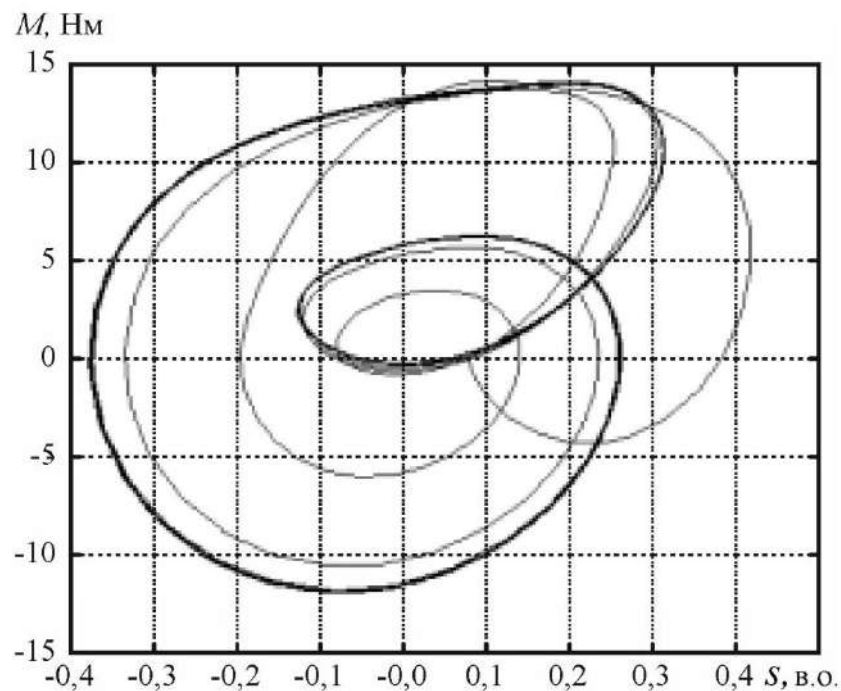


Рис. 4.6 Залежність $M = f(s)$ двигуна 4A80A6Y3 $M_c = f(\theta)$, $J_1 = 0,0046 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

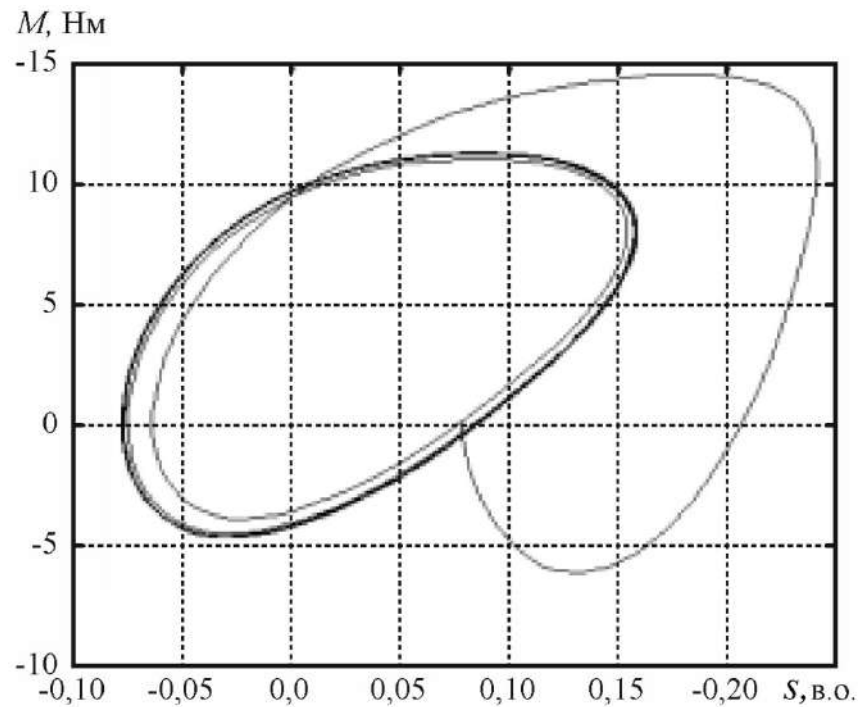


Рис. 4.7 Залежність $M = f(s)$ двигуна 4А80А6В3 $M_c = f(\theta)$, $J_2 = 5J_1$

При збільшенні моменту інерції в 5 разів (до $J_2 = 0,023 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) скорочується розмах коливань струмів статора – від $\Delta i_{s1} = 3,81 \text{ А}$ до $\Delta i_{s2} = 1,23 \text{ А}$), струмів ротора – від $\Delta i_{r1} = 478 \text{ А}$ до $\Delta i_{r2} = 333,7 \text{ А}$, електромагнітного моменту – від $\Delta M_1 = 13,9 \text{ Н} \cdot \text{м} - (-11,9 \text{ Н} \cdot \text{м}) = 25,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$ до $\Delta M_2 = 11,9 \text{ Н} \cdot \text{м} - (-4,7 \text{ Н} \cdot \text{м}) = 16,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Таким чином, збільшення моменту інерції в 5 разів сприяє зниженню $\delta\omega_r$ в 2,7 рази, $\delta\tilde{i}_s$ – в 2,8 рази, δM – в 1,5 рази, втрат – в 1,5 рази.

У випадку пульсуючого навантаження пульсації електромагнітного моменту при J_1 становлять $\delta M = 440\%$, частоти обертання ротора – $\delta\omega_r = 40,6\%$ (рис.4.8, а), струму ротора $\delta\tilde{i}_r = 137,3\%$, струму статора $\delta\tilde{i}_s = 72,8\%$. При цьому сумарні втрати в міді статора в 2 рази більше, ніж у статичному режимі. Збільшення моменту інерції в 5 разів дозволяє суттєво знизити пульсації (рис. 4.8,б) та максимально наблизитися до параметрів сталого режиму за енергетичними показниками (табл.4.3): ККД $= 73,9\%$ (74% для $M_c = \text{const}$), коефіцієнт потужності $\alpha = 47,8\%$ (48% для $M_c = \text{const}$).

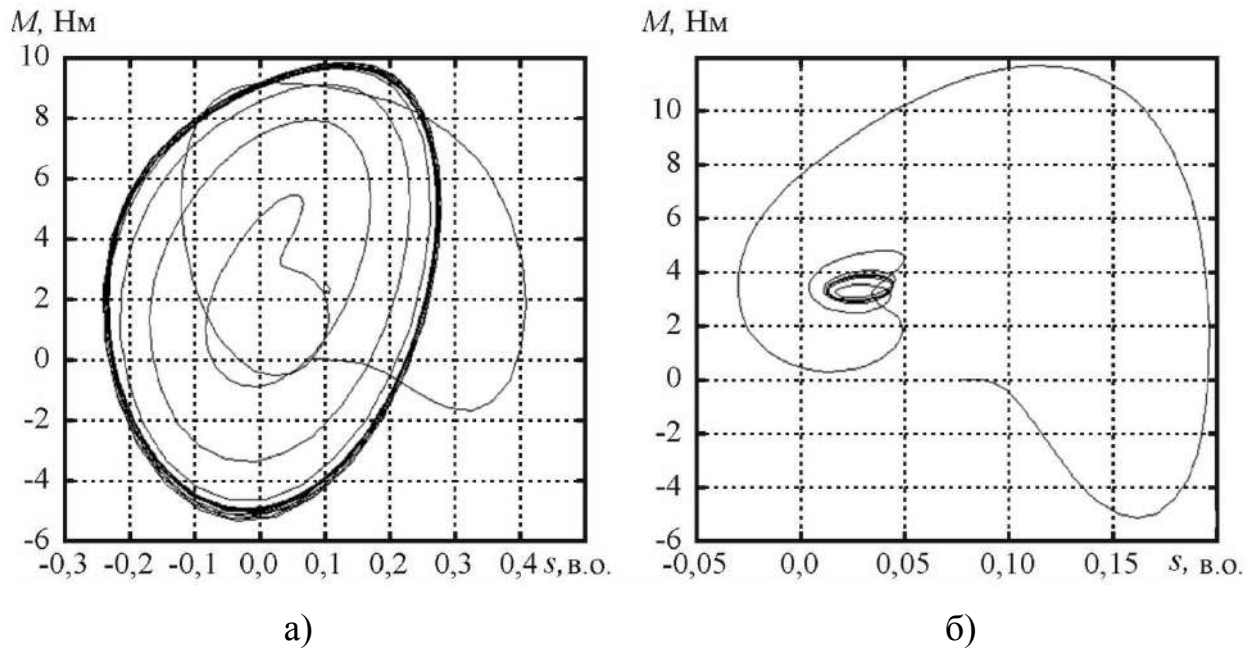


Рис. 4.8 Залежності $M = f(s)$ двигуна 4А80А6У3 з пульсуючим навантаженням для $J_1 = 0,0046 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (а) і $J_2 = 5J_1$ (б)

Початкова точка для всіх розрахунків відповідає ковзанню $s = 0,08$. Зіставляючи рис. 4.6 з рис. 4.7 та рис. 4.8, а з рис. 4.8, б слід зазначити, що при середньому моменту навантаження $M_{ср} = 3,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$ меншому моменту інерції відповідає більш інтенсивний перехідний процес, що частково охоплює генераторну область. Збільшення моменту інерції обмежує коливання динамічного електромагнітного моменту, що наочно відображено на графіках 4.7 і 4.8, б.

Показано, що зі збільшенням моменту інерції приводу, що досліджується, у 5 разів можна підвищити ККД асинхронного двигуна на 10%, практично до його номінального значення у статиці (73,9), та знизити пульсації частоти обертання в 3 рази. Однак, дане технічне рішення супроводжується суттєвим збільшенням масо-габаритних показників приводу. У випадку одноциліндрового компресора з використанням цього технічного рішення можна збільшити ККД на 10% (лише до 56,08%), що частково вирішує задачу підвищення енергоефективності герметичних поршневих компресорів. Вона є комплексною і потребує поряд з раціональним вибором моменту інерції приводу виконувати оптимізацію параметрів асинхронного двигуна.

Уточнимо діапазон граничних потужностей шести полюсних АД, для яких доцільне проектування з врахуванням динаміки навантаження з метою підвищення їх енергоефективності в робочих режимах. Дослідження проведено для двигуна 4A160УЗ при живленні симетричною трифазною напругою, який використовується у відкритих поршневих компресорах ЗВШО.6-1.5/7.3А2 і ЗВШО.6-1.5/7.3А4. Технічні характеристики двигуна: номінальна потужність 11 кВт; номінальна частота обертання вала компресора 980 хв^{-1} ; номінальний момент $108 \text{ Н} \cdot \text{м}$; число пар полюсів $p = 3$; момент інерції ротора двигуна $J_p = 0,14 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Момент інерції компресора $J_k = 1,28 J_p = 0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Досліджено режими АД з періодичними навантаженнями, що умовно позначені ВН1 і ВН3, часові залежності яких візуально відповідають рис. 4.4 з $T_n = 0,062 \text{ с}$. Побудовані залежності мають максимальні значення $M_{c \text{ макс}} = 129 \text{ Н} \cdot \text{м}$ та кратність максимального моменту $\kappa_m = 2,4$ для навантаження ВН1 та $M_{c \text{ макс}} = 210 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ($\kappa_m = 2,47$) – для ВН3.

Результати розрахунку потужності, що споживається, корисної потужності, втрат в обмотках статора й ротора, втрат у сталі, частоти обертання ротора і ККД при різних значеннях моменту інерції для періодичного $M_c = f(\theta)$ і постійного ($M_c = \text{const}$) навантаження представлено в табл. 4.5. Максимальні і мінімальні значення струмів фаз, електромагнітного моменту, частоти обертання ротора АД та їх відносних пульсацій у квазісталих режимах при періодичному і постійному навантаженнях – в табл. 4.6.

Відхилення результатів розрахунків з періодичним навантаженням в порівнянні зі сталим навантаженням: по корисної потужності – 2,37%, по ККД – 2% і частоті обертання ротора АД – у межах 11...22%. Визначено, що збільшення моменту інерції на 17% дозволяє знизити пульсації частоти обертання шести полюсних двигунів потужністю 11 кВт на 3...5%.

Таблиця 4.5

Результати розрахунків показників АД потужністю 11 кВт у квазісталих режимах для навантаження ВНЗ і різних моментах інерції

Тип навантаження ВНЗ	J кг · м ²	P_2 Вт	ω_{cp} с ⁻¹	M_{csp} Н · м	P_{ms} Вт	P_{mr} Вт	P_{cm} Вт	P_1 Вт	η %
$M_c = const$	0,18	8790	102,9	85,44	439,8	157	456,17	9813,5	89,57
	0,21	8651	102,7	83,98	498,3	178,2	453,91	9781,4	88,44
$M_c = f(\gamma)$	0,18	8582	102,9	85,44	529,4	189,6	455,7	9756,7	87,96
	0,21	10550	101	83,98	781,4	281,5	467,4	12080,3	87,33

Таблиця 4.6.

Результати розрахунків пульсацій частоти обертання ротора і електромагнітних моментів двигуна 4А160УЗ з періодичним навантаженням

Навантаження	J кг · м ²	M_{max} Н · м	M_{min} Н · м	$\omega_{r, max}$ с ⁻¹	$\omega_{r, min}$ с ⁻¹	$i_{s, max}$ А	$i_{s, min}$ А	$i_{r, max}$ А	$i_{r, min}$ А	$\delta\omega_r$ %	ΔM %
ВН1	0,18	83,5	14,0	110,5	96,2	14,34	4,36	605,5	154,0	13,7	133,6
	0,21	77,5	22,6	109,0	97,7	13,0	4,85	554,5	178,2	10,9	105,6
ВНЗ	0,18	131,2	28,6	113,8	91,1	23,45	7,55	1000	291,5	22,1	120
	0,21	122	40	111,5	93,5	21,54	8,47	917,6	337,7	17,5	97,6

Наведені результати підтверджують необхідність оптимального проектування трифазних АД малої та середньої потужності у діапазоні 0,1...15 кВт у складі систем із змінним навантаженням, поршневих компресорів тощо, на основі дослідження показників квазісталих режимів з врахуванням періодичного навантаження з метою підвищення енергоефективності двигунів у робочих режимах.

4.5 Дослідження впливу моменту інерції та ємності робочого конденсатора на показники квазісталих режимів АКД поршневих компресорів

Проведено дослідження квазісталих режимів однофазних конденсаторних АД з періодичним навантаженням поршневих одноциліндрових компресорів, визначено вплив моменту інерції та ємності робочого конденсатора на ККД і пульсації струмів статора й ротора, електромагнітного моменту і частоти обертання ротора двигунів при постійному і періодичному навантаженнях.

Розглядаються чотиріполюсні АКД малої потужності (30Вт і 200Вт, $n_n = 1450 \text{ об/хв}$) з двофазною обмоткою статора, схема CSC [21, 116]. У допоміжну фазу двигунів, що розташована під кутом 90° щодо головної обмотки, послідовно включений робочий конденсатор з номінальною ємністю $C_{pn} = 1,5 \text{ мкФ}$ для двигуна з $P_n = 30 \text{ Вт}$ і $C_{pn} = 12 \text{ мкФ}$ – для двигуна потужністю 200 Вт. Ємність робочого конденсатора обирається за умови наявності кругового електромагнітного поля в номінальному режимі роботи при постійному номінальному навантаженні. Тому для інших режимів роботи, відмінних від номінального (квазісталих тощо), які характеризуються еліптичністю поля, ємність робочого конденсатора не задовольняє оптимальному її значенню за максимальним ККД для даного режиму. Використана математична модель бібліотеки SimPowerSystems [199], яка доповнена залежністю $M_c = f(\theta)$ ($M_{\text{смакс}} = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$) та алгоритмом розрахунку показників квазісталих режимів (див. п. 2.2). Для оцінки адекватності динамічної моделі проведено порівняння чисельних розрахунків при постійному номінальному навантаженні з експериментальними даними і розрахунками номінального сталого режиму, що представлено в [129].

Спочатку розглянемо режими двигуна потужністю 30 Вт, параметри якого мають наступні значення: активний опір головної обмотки статора $R_{sa} = 71 \text{ Ом}$; індуктивність розсіювання головної обмотки статора $L_{sa} = 0,133 \text{ Гн}$; активний опір допоміжної обмотки $R_{sb} = 25,13 \text{ Ом}$; індуктивність розсіювання допоміжної обмотки статора $L_{sb} = 14,87 \text{ Гн}$; активний опір обмотки ротора $R'_r = 75 \text{ Ом}$; наведена індуктивність розсіювання обмотки ротора $L'_r = 0,11 \text{ Гн}$; взаєміндуктивність $L_m =$

1,69 Гн; коефіцієнт трансформації $k_T=0,595$. Момент інерції приводу (базове значення) $J_1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Результати математичного моделювання (діючі значення струмів головної I_{sa} й допоміжної обмоток I_{sb} , лінійного струму I_s , частота обертання ротора двигуна, електромагнітний момент) у квазісталому режимі при $M_c = \text{const}$ для періоду напруги живлення 0,02с зведено у табл. 4.7. Похибка у цих розрахунках (для ємності конденсатора 2,5 мкФ) в порівнянні з експериментальними даними [129] складає для: ω_r – 0,7%, P_n – 1,3%,– P_1 14%, I_s – 24,9%. Результати розрахунків при $M_c = f(\gamma)$ відрізняються від експериментальних даних по ω_r – на 1,25%, P_n – на 5,3%, I_s – на 35%.

Таблиця 4.7

Дані двигуна, розмір	Результати чисельних та експериментальних досліджень			
	Експериментальні дані [129]	Розрахунки номінального режиму [129]	Розрахунки квазісталого режимів	
			$M_c = \text{const}$	$M_c = f(\gamma)$
Потужність, Вт	30	30	29,6	28,4
Напруга, В	220	220	220	220
Ємність робочого конденсатора, мкФ	2,5	1,5	2,5	1,5
Частота обертання, рад/с	151,0	151,8	149,9	149,6
Лінійний струм, I_s А	0,41	0,40	0,512	0,627
Момент, Нм	0,196	0,196	0,197	0,19
ККД, %	34,0	48,6	34,45	35,6
Відношення витків головної й допоміжної обмоток, в.о.	0,794	0,595	0,794	0,595
Потужність, яка споживається двигуном, Вт	88,23	61,7	75,86	79,7

З осцилограми сталого режиму при $M_c = \text{const}$ (рис. 4.9) видно, що електромагнітний момент $M_e(t)$ конденсаторного двигуна пульсує з подвійною частотою мережі біля заданого значення моменту навантаження. Пульсації $M_e(t)$ в сталому режимі викликають у свою чергу пульсації частоти обертання.

На рис. 4.10 представлена динамічна механічна характеристика двигуна $M_e = f(\omega_r)$ при сталому навантаженні, яка описує еліпс. Зміна ω_r від його максимального значення до мінімального у сталому режимі визначається розміром діаметра еліпса по абцисі x , зміна M_e – по ординаті y . Ступень нерівномірності частоти обертання ротора дорівнює 50% для базового значення моменту інерції ($J_1 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) і 4% – при його збільшенні у 10 разів ($J = 3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$)

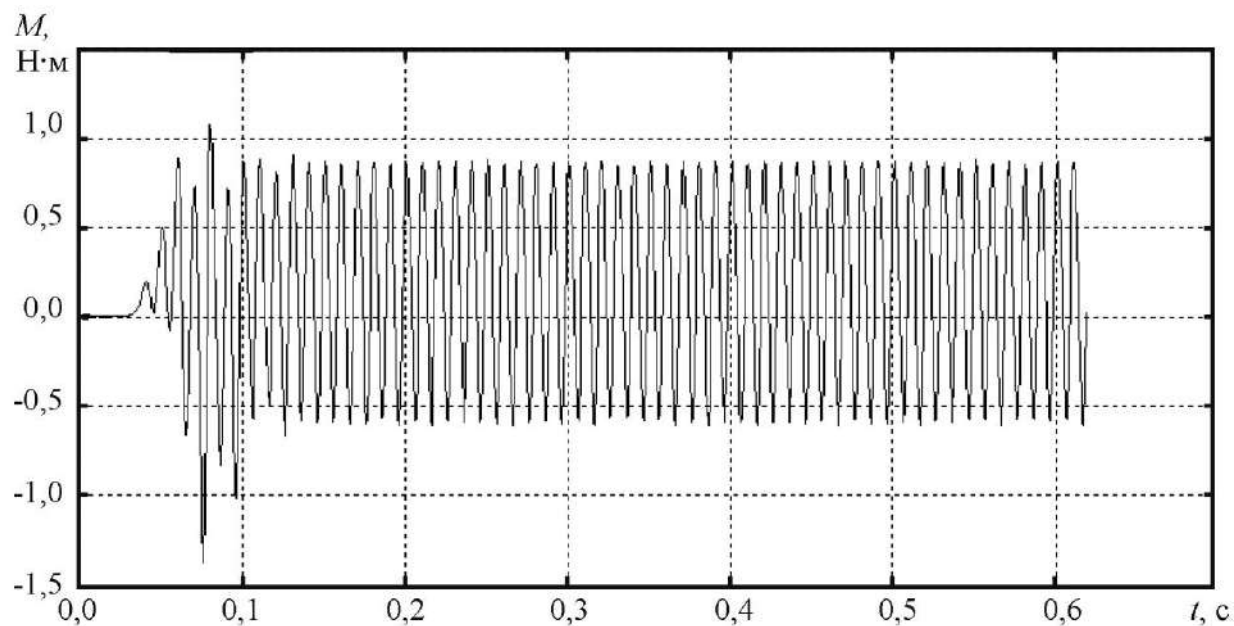


Рис. 4. 9 Залежність $M_e(t)$ АКД ($J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) у сталому режимі

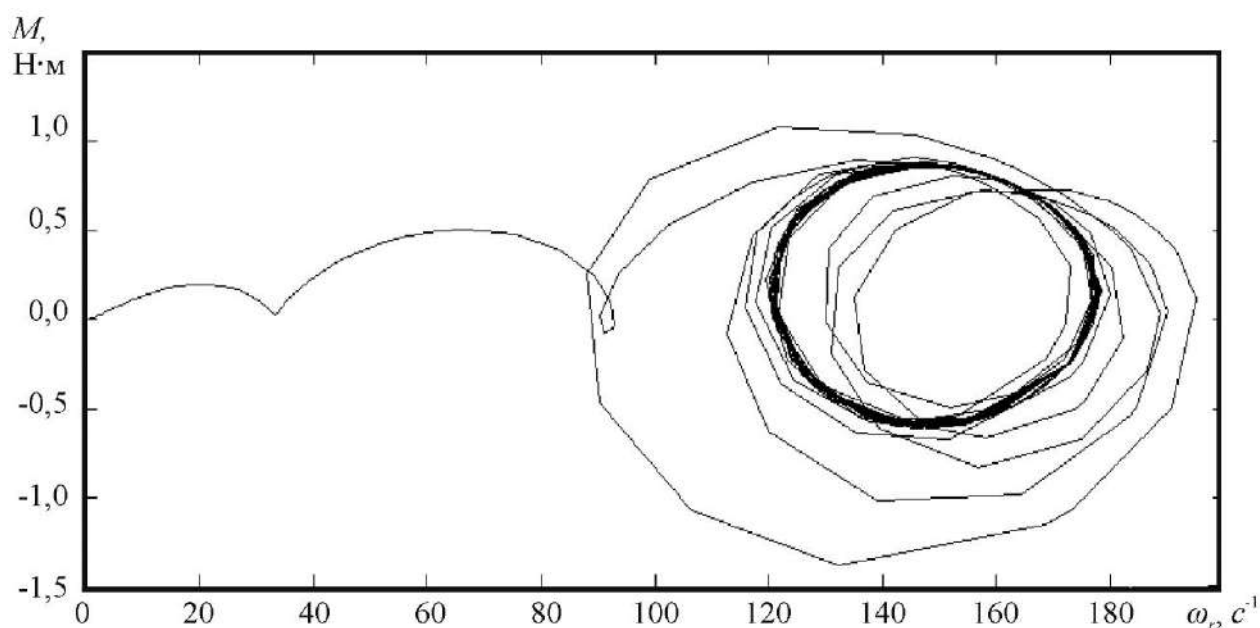


Рис. 4.10 Залежність $M_e = f(\omega_r)$ ($J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) у сталому режимі

Результати розрахунку струмів фаз статора, електромагнітного моменту, частоти обертання ротора двигуна при варіюванні ємністю робочого конденсатора для режимів з постійним і періодичним навантаженням зведено у табл. 4.8

Таблиця 4. 8

Результати досліджень режимів АКД за зміни ємності робочого конденсатора

при $M_c = f(\theta)$ та $M_c = const$, $J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$,

Вид навантаження	C_p мкФ	P_2 Вт	η %	P_1 Вт	I_s А	ω_{rcp} c^{-1}	M_{cp} Н·м
$M_c = const$	1,5	26,17	32,84	79,7	1,146	149,4	0,18
$M_c = f(\gamma)$		22,46	23,22	96,74	1,329	149,0	0,18
$M_c = const$	2,0	26,16	33,71	77,61	1,075	149,8	0,18
$M_c = f(\gamma)$		23,73	25,34	93,62	1,25	149,4	0,182
$M_c = const$	2,5	26,13	34,45	75,86	1,006	150,2	0,18
$M_c = f(\gamma)$		25,37	28,81	88,05	1,157	148,3	0,185
$M_c = const$	3,0	26,1	35,0	74,5	0,938	150,6	0,18
$M_c = f(\gamma)$		22,24	25,98	85,62	1,077	150,4	0,182

Залежності $i_s(t)$, $M_e(t)$ та динамічна механічна характеристика $M_e = f(\omega_r)$ при періодичному моменті навантаження $M_c = f(\theta)$ представлено на рис. 4.11, рис. 4.12, рис.4.13 відповідно. З осцилограм видно, що при $M_c = f(\theta)$ період повторення часових залежностей струмів, частоти, моменту становить $T_H = 0,24\text{с}$.

Розрахунки показали, що *при періодичному* навантаженні з базовим моментом інерції і номінальною ємністю конденсатора ($J = 0,00003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ та $C_{pn} = 1,5 \text{ мкФ}$) ККД двигуна знижується ($\Delta\eta = 9,6\%$) у порівнянні з постійним навантаженням, що дорівнює його середньому значенню $M_{cp} = 0,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Тобто, існує резерв для підвищення ККД, який можна отримати у результаті вибору раціональних значень ємності робочого конденсатора і моменту інерції приводу з врахуванням навантаження. Визначено, що ККД, дійсно, можна

підвищити на 5,6% (до 28,8%) завдяки збільшенню ємності робочого конденсатора до 2,5 мкФ.

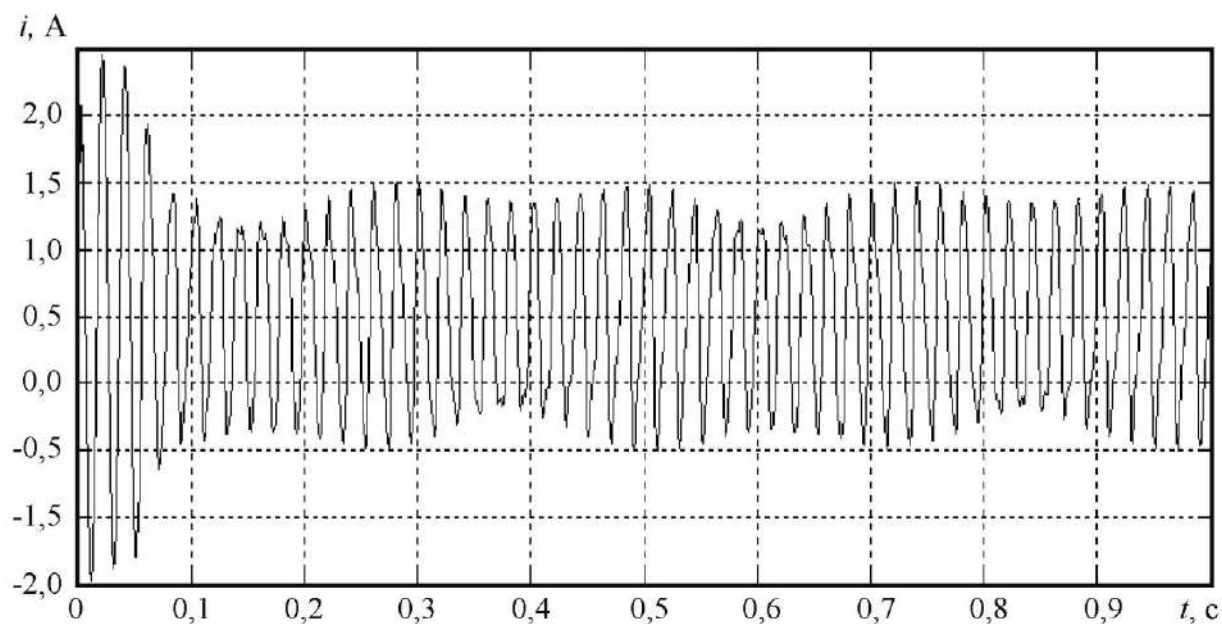


Рис. 4.11 Залежність $i_s = f(t)$ при $M_c = f(\theta)$ ($J = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_p = 1,5 \text{ мкФ}$)

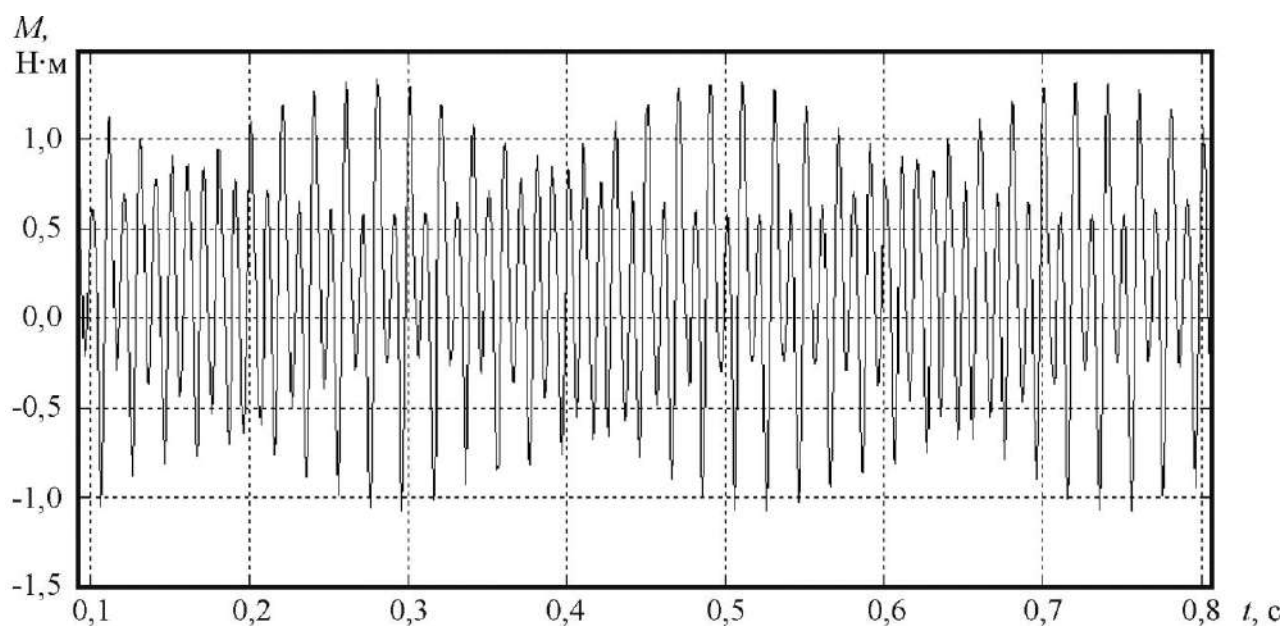


Рис. 4. 12 Залежність $M_e = f(t)$ при $M_c = f(\theta)$ ($J = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_p = 1,5 \text{ мкФ}$)

Досліджено миттєві значення струмів, електромагнітних моментів та частоти обертання ротора АД, пульсації струмів і частоти обертання ротора при постійному й періодичному навантаженнях за зміни моменту інерції привода у діапазоні $4 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (табл. 4.9)

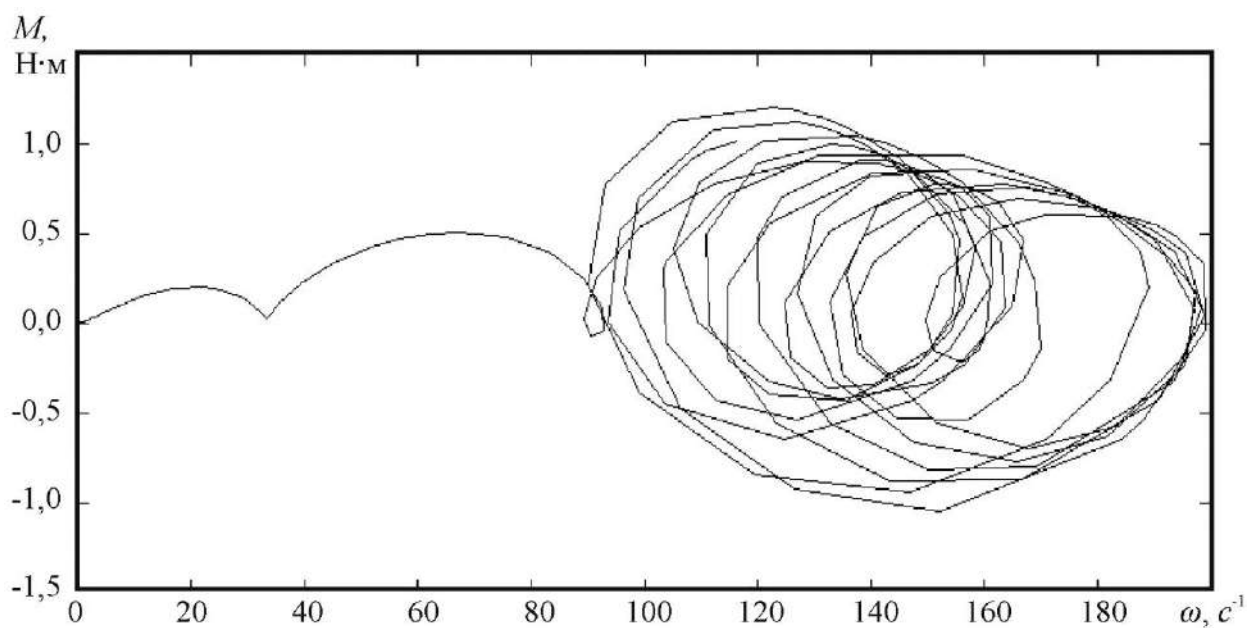


Рис.4.13 Динамічна механічна характеристика ($J = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_p = 1,5 \text{ мкФ}$)

Таблиця 4.9

Результати досліджень квазісталіх режимів АКД потужністю 30 Вт за зміни моменту інерції приводу, $C_p = 1,5 \text{ мкФ}$

Тип навантаження	J кг·м ²	P_2 Вт	$M_{\text{макс}}$ Н·м	$M_{\text{мін}}$ Н·м	$i_{s \text{ макс}}$ А	$i_{s \text{ мін}}$ А	δi_s %	$\omega_r \text{ макс}$ с ⁻¹	$\omega_r \text{ мін}$ с ⁻¹	$\delta \omega_r$ %
$M_c = \text{const}$	0,0003	23,62	0,74	-0,4	0,75	-0,75	0	154	148	4,0
	0,00003	22,1	0,95	-0,67	0,767	-0,757	0	189	105	49,5
	0,000035	26,89	0,9	-0,6	0,776	-0,773	0	182	115	44,8
	0,00004	24,86	0,868	-0,58	0,755	-0,755	0	177	120,2	37,8
$M_c = f(\theta)$	0,0003	22,52	0,73	0,4	0,755	-0,755	0	156	145	7,4
	0,00003	23,73	1,66	1,5	1,23	0,72	38,4	220	20	134
	0,000035	23,18	1,5	1,2	1,1	0,65	36,3	205	55	101

Показано, що при $M_c = f(\theta)$ і базовому значенні моменту інерції приводу компресора $\delta \omega_r = 134\%$, $\delta i_s = 38,4\%$. %. Якщо збільшити момент інерції у десять разів, то отримаємо відносні пульсації частоти обертання $\delta \omega_r = 7,4\%$, що дозволяє наблизитися до показників режиму з постійним навантаженням.

Проведено дослідження впливу ємності робочого конденсатора за її зміни у діапазоні $(1...2,3) \cdot C_{pn}$ на ККД двигуна за зміни моменту інерції у діапазоні $(1,17...167) \cdot J_1$ (табл. 4.10) та пульсації частоти обертання ротора $\delta\omega_r$ і струму статора δI_s при постійному значенні моменту інерції $J = 1,3 \cdot J_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ [21]. Визначено, що ККД двигуна з періодичним навантаженням зменшується на 3...6%, ступінь нерівномірності частоти обертання збільшується на 36...43% в порівнянні з постійним навантаженням. Найменші пульсації у квазісталих режимах має двигун з $C_p = 1,67C_{pn} = 2,5 \text{ мкФ}$.

Таблиця 4.10

Результати досліджень квазісталих режимів АКД потужністю 30 Вт при варіюванні ємністю робочого конденсатора й моменту інерції

Вид навантаження	J кг · м ²	P_2 Вт	η %	C_p мкФ	P_1 Вт	I_s А	ω_{rcp} с ⁻¹	M_{cp} Н·м
$M_c = const$	0,00004	24,72	33,78	1,5	72,95	1,09	150,1	0,17
$M_c = f(\theta)$		24,34	30,97		78,59	1,15	149,7	0,17
$M_c = const$	0,00005	24,29	34,61	2,0	70,19	1,06	150,3	0,167
$M_c = f(\theta)$		23,95	33,15		72,26	1,1	150	0,167
$M_c = const$	0,000035	26,49	36,18	2,5	73,21	0,97	150,3	0,167
$M_c = f(\theta)$		23,95	33,15		72,26	1,1	150	0,167
$M_c = const$	0,00004	25,5	37,22	3,5	68,5	0,82	151,2	0,176
$M_c = f(\theta)$		24	33,0		77,69	0,90	151	0,176

В результаті досліджень квазісталих режимів АКД номінальної потужності 200Вт ($C_{pn} = 12 \text{ мкФ}$) з пульсуючим навантаженням ($J_1 = 3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) визначено раціональне значення ємності робочого конденсатора ($C_p = 0,67C_{pn} = 8 \text{ мкФ}$), яка забезпечує збільшення ККД на 3,5% (максимальний ККД – 80 %), при цьому рівень пульсацій частоти обертання 14%. Збільшив момент інерції до $J_2 = 1,3J_1 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ при $C_p = 8 \text{ мкФ}$ можна знизити $\delta\omega_r$ на 6 % [116].

4.6 Дослідження квазісталих режимів двополюсного асинхронного двигуна з двофазною синусною обмоткою статора електроприводу ГПК

Найбільш розповсюдженим типом АД для герметичних поршневих (які, як правило, одноциліндрові) компресорів є однофазні двополюсні двигуни з двофазною розподіленою синусною обмоткою статора, з робочим конденсатором, для пуску яких використовуються пускові конденсатори (схема SCR) або позистори (схема RSCR) [26].

Об'єктом дослідження є двополюсний двигун типу ДАО потужністю 100 Вт з номінальною ємністю робочого конденсатора $C_{pn} = 3,9 \text{ мкФ}$, довжиною пакета статора $l_s = 33 \text{ мм}$. Обмотка двигуна синусна, одно-двошарова концентрична, симетрична. Симетричність визначається тим, що головна й допоміжна обмотки складаються із двох котушкових груп з однаковим числом секцій, число яких дорівнює чотирьом. Синусна обмотка характеризується розподілом провідників по пазах за синусоїдальним законом, що дозволяє наблизити криву МРС до синусоїди та зменшити вплив гармонічних складових і покращити характеристики АД. Дослідження режимів двигуна виконано за допомогою математичної моделі (див. п. 2.6) із визначенням параметрів заступної схеми за конструктивними даними двигуна і врахуванням їх зміни в залежності від режиму роботи та періодичного навантаження.

Розрахунки номінального режиму асинхронного двигуна з «синусною» обмоткою при варіюванні ємністю робочого конденсатора з врахуванням третьої гармоніки наведено у табл.4.11. При розрахунках коефіцієнт насичення по першій гармоніці прийнятий рівним 1,57, по третій – 1,15, ковзання $s = 0,032$. Показано, що у випадку «синусної» обмотки третя гармоніка практично не впливає на розрахунки, максимальне значення ККД відповідає номінальній ємності 3,9 мкФ. Досліджено робочі режими АД за зміни ємності робочого конденсатора у межах 2...10 мкФ при постійному і періодичному навантаженнях з моментом опору $M_{scr} = 0,34 \text{ Н·м}$ за допомогою математичної моделі (див розд. 2).

Таблиця 4.11

Результати розрахунку сталого режиму АД з врахуванням третьої гармоніки

Параметри номінального режиму	Гармоніки ν , що враховано	
	$\nu=1$	$\nu=1;3$
Ємність робочого конденсатора, C_p , мкФ	3,9	3,9
Частота обертання, n , об/хв	2904	2904
Ковзання, s , в.о.	0,032	0,032
Лінійний струм, I_s	0,56	0,565
Електромагнітний момент, M	0,33	0,33
ККД, η	74,74	74,6
Потужність, P_n , Вт	100,3	100,08

При порівнянні цих режимів розглядалась величина корисної потужності P_2 , яка дорівнює середньому значенню P_{cp} миттєвої потужності на валу $P_2(t)$. Розраховано втрати в обмотках статора і ротора, втрати в сталі, механічні, додаткові та ККД. Результати розрахунків квазісталіх режимів з періодичним навантаженням для базового моменту інерції приводу $J_1 = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ та $J_2 = 5 \cdot J_1$ представлено у табл. 4.12 і табл. 4.13.

Таблиця 4.12

Результат розрахунку квазісталіх режимів АД ($J_1 = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$)

C_p мкФ	$M_{ср}$, Н·м	P_2 , Вт	η , %	ΔM , %	$\delta\omega_r$, в. о.
2,0	0,344	100,98	59,15	249,2	13,09
3,0	0,344	100,2	59,77	203,6	12,59
3,9	0,3437	101,45	61,63	190,24	11,6
5,0	0,3425	101,9	60,35	188,0	11,72
7,0	0,344	102,59	58,68	133,2	10,86
10,0	0,3438	102,13	52,86	138,18	11,0

Для режиму зі сталим навантаженням ($J_1 = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) характерні високі пульсації електромагнітного моменту (у діапазоні 78...246%), незначні пульсацій частоти обертання (1...3,1%) та зміна ККД у діапазоні 57,9...60% ($C_p =$

2...7 мкФ). Найменші значення пульсацій відповідають ємності $C_p=7$ мкФ, найбільший ККД (60%) – номінальній ємності 3,9 мкФ.

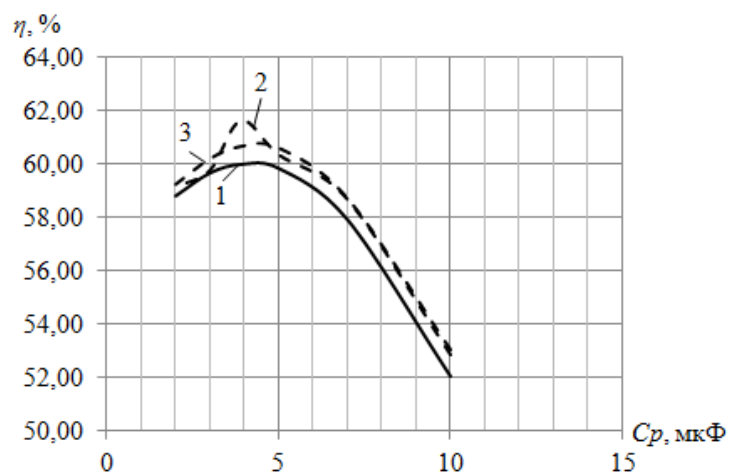
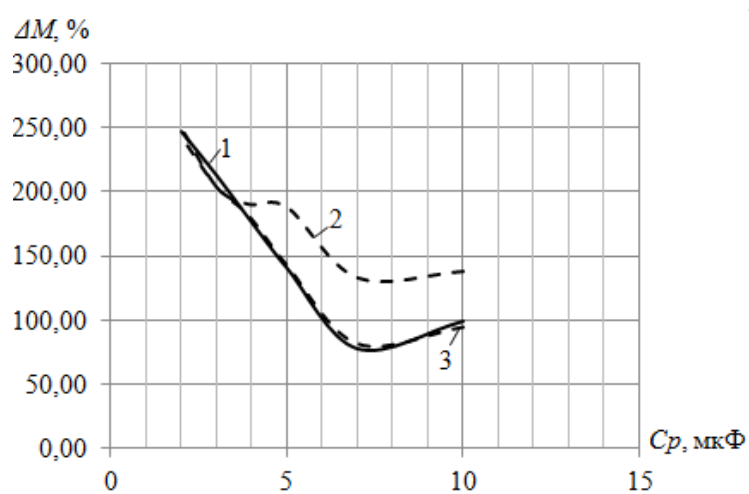
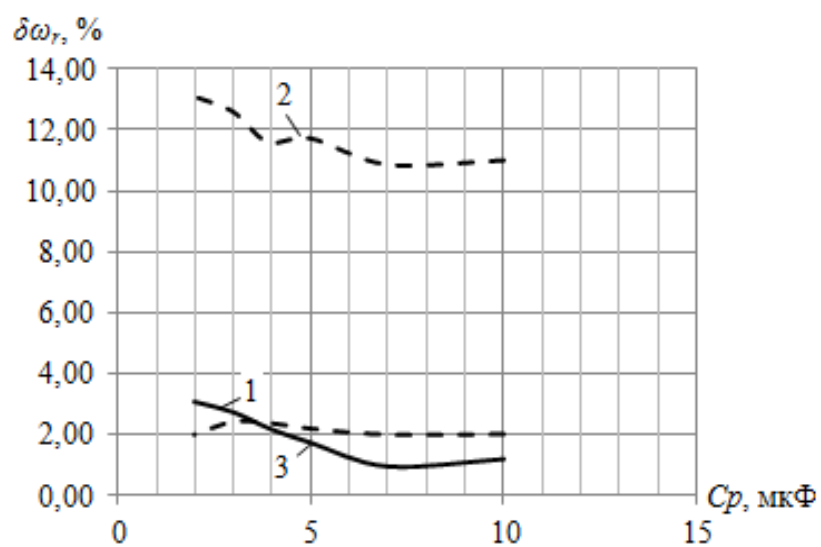
Таблиця 4.13

Результат розрахунку квазісталих режимів ОАД ($J_2 = 5 \cdot J_1$)

$C_p, \text{мкФ}$	$M_{ссп}, \text{Н} \cdot \text{м}$	$P_2, \text{Вт}$	$\eta, \%$	$\Delta M, \%$	$\delta\omega_r, \text{в. о.}$
2,0	0,343	100,57	59,23	242,87	2,02
3,0	0,343	100,98	60,19	203,6	2,4
3,9	0,344	101,27	60,65	181,8	2,37
5,0	0,345	101,89	60,59	142,6	2,2
7,0	0,343	101,7	58,71	81,6	2,02
10,0	0,344	102,61	53,05	94,6	2,03

Для періодичного навантаження з $J_1 = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ нижня границя пульсацій електромагнітного моменту знижується до 133%, пульсації частоти обертання двигуна збільшуються в 4 рази (до 13%), що є допустимим для ГПК. Мінімальні значення цих пульсацій відповідають ємності робочого конденсатора (7мкФ) з меншим на 3% значенням ККД, ніж при номінальній ємності ($C_p=3,9$ мкФ). Визначено, що максимальний ККД при періодичному навантаженні (табл. 4.12) відповідає $C_{pn}=3,9\text{мкФ}$ і на 13% менше, ніж у сталому режимі, та на 1,63% більше, ніж при $M_c = \text{const}$ у квазісталому. При збільшенні моменту інерції приводу у 5 разів пульсації частоти обертання ротора зменшуються до рівня 2...2,4%, що задовольняє вимогам відкритих компресорів. Залежності $\eta = f(C_p)$, $\Delta M = f(C_p)$, $\delta\omega_r = f(C_p)$ для $M_c = \text{const}$ (лінії суцільні) і $M_c = f(\gamma)$ (пунктирні лінії) для розглянутих моментів інерції зображені на рис. 4.14, рис. 4.15, рис 4.16 відповідно.

Підсумовуючи результати досліджень можна підкреслити особливості квазісталих режимів і науково обґрунтувати *ефективне* використання асинхронних конденсаторних дво полюсних двигунів з двофазною розподіленою синусною обмоткою статора для *номінального навантаження* електроприводу одноциліндрових поршневих компресорів.

Рис. 4.14 Залежності $\eta = f(C_p)$ Рис. 4.15 Залежності $\Delta M = f(C_p)$ Рис. 4.16 Залежності $\delta\omega_r = f(C_p)$

Позначення для сталого навантаження – 1, для періодичного навантаження: 2 – $J_1 = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, 3 – $J_2 = 5 \cdot J_1$.

1. Електромагнітний момент конденсаторного АД на відміну від ТАД змінюється з подвійною частотою, в результаті чого пульсації частоти обертання двигуна при номінальному моменті опору одноциліндрових поршневих компресорів не перебільшують допустимі. Для двополюсного конденсаторного АД – не більш 13%.

2. З'ясовано, що номінальна ємність робочого конденсатора $C_{pn}=3,9$ мкФ забезпечує максимальне значення ККД асинхронного двигуна з синусними обмотками статора (схема SCR) потужністю 100 Вт як при постійному (60%), так й періодичному (61,63%) навантаженнях.

В результаті досліджень квазісталих режимів за зміни ємності робочого конденсатора від номінального значення C_n до $1,5 \cdot C_n$ ($C_n = 3,3$ мкФ) виявлено незначне зниження ККД (на 1,5%) в порівнянні з постійним навантаженням. Це дає підстави для використання номінальної ємності робочого конденсатора для режиму з періодичним навантаженням, середнє значення якого дорівнює номінальному. Визначена ємність робочого конденсатора $C_p = 1,8C_{pn}$, яка забезпечує мінімальні пульсації електромагнітного моменту й частоти обертання ротора АД ГПК. При цьому ККД знижуються до 3% в порівнянні з номінальним режимом.

3. Врахування періодичного навантаження дозволяє адекватно оцінити пульсації електромагнітного моменту й частоти обертання ротора поршневих одноциліндрових поршневих компресорів. Максимальна похибка у розрахунках в порівнянні з постійним навантаженням складає 84,6% - для $\delta\omega_r$ і 38% — для ΔM .

4. Встановлено розбіжності результатів розрахунків сталого і квазісталого режимів: ККД –13%, показників АД з врахуванням третьої гармоніки і без неї – не більш 1%.

4.7 Аналіз результатів розрахунків. Визначення шляхів підвищення енергоефективності АД в робочих режимів із змінним навантаженням

За результатами досліджень (табл. 4.14), виявлено особливості квазісталих режимів АД зі змінним навантаженням, які полягають у:

Таблиця 4.14

**Порівняльні результати досліджень характеристик робочих режимів
асинхронних двигунів одно - і двоциліндрових поршневих компресорів**

Тип двигуна, номінальні дані	Режими дослідження	Тип навантаження	Показники робочих режимів
1	2	3	5
Однофазний асинхронний конденсаторний двигун $2p = 4, m = 2$ $U_n = 220$ В $P_n = 30$ Вт $C_p = 1,5$ мкФ $n_n = 1450$ об/хв. $J_p = 2 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ $J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	Квазісталі $C_p - var$ $(1,5 \dots 3,5)$ мкФ $J = (3 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ $J = 3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$M_c = const$ $M_c = 0,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$\eta = (32,8 \dots 37,2)\%$ $\delta\omega_r = (38 \dots 50)\%$ $\Delta M = (804 \dots 911)\%$ $\eta = (31 \dots 37)\%$ $\delta\omega_r = 4\%$ $\Delta M = 633\%$
	$J = (3 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}) \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ $J = 3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$M_c = f(\theta)$ $M_{ce} = 0,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$ $T_n = 0,24$ с	$\eta = (23,2 \dots 33)\%$ $\delta\omega_r = (100 - 134)\%$ $\Delta M = (89 - 166)\%$ $\eta = 23,2\%$ $\delta\omega_r = 7,4\%$ $\Delta M = 183\%$
	Усталені $C_p = 3,9$ мкФ $J = \infty$	$M_c = const$ $M_c = 0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$P_2 = 98$ Вт, $M = 0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$ $\eta = 74,7\%$ $\omega_r = 303,95$ об/хв $\Delta M = 0, \delta\omega_r = 0$
	Квазісталі $J = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ $C_p - var, (2,0 \dots 10)$ мкФ	$M_c = const$ $M_c = 0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$ $M_c = f(\theta)$ $M_{ce} = 0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$	$\eta = (50,8 \dots 61,2)\%$ $\Delta M = (95 \dots 221)\%$ $\delta\omega_r \leq 3,1\%$ $\eta = (52,86 - 61,63)\%$ $\Delta M = (137 \dots 270)\%$ $\delta\omega_r = (11,9 \dots 14,5)\%$

Продовж. табл. 4.14

1	2	3	4
Трифазний асинхронний двигун 4A80A6УЗ $2p = 6, m = 3$ $U_n = 220$ В $P_n = 700$ Вт $n_n = 980$ об/хв $M_n = 3,33$ Н·м $J_p = 0,0031$ кг·м ² $J = 4,6 \cdot 10^{-3}$ кг·м ² схема обмотки статора – "трикутник"	Усталені $J = \infty$	$M_c = const$ $M_c = 3,3$ Н·м	$P_2 = 338,5$ Вт $M = 3,33$ Н·м $\eta = 74$ %
	Квазісталі $J - var$ $M_c - var$ $J_1 = J = 4,6 \cdot 10^{-3}$ кг·м ²	Пульсуюча $M_{ce} = 3,3$ Н·м $n_u = 2$	$P_2 = 315,4$ Вт $\eta = 58,1$ % $\Delta M = 440$ % $\delta\omega_r = 4,2$ %
	$J_2 = 5J_1 = 23 \cdot 10^{-3}$ кг·м ²		$P_2 = 338,4$ Вт $\eta = 73,9$ % $\Delta M = 4,2$ % $\delta\omega_r = 1$ %
	$J_1 = 4,6 \cdot 10^{-3}$ кг·м ²	Періодична $M_{ce} = 3,3$ Н·м $n_u = 1$	$P_2 = 295,2$ Вт $\eta = 46,7$ % $\Delta M = 772$ % $\delta\omega_r = 81,5$ %
	$J_2 = 23 \cdot 10^{-3}$ кг·м ²		$P_2 = 295,6$ Вт $\eta = 56,08$ % $\Delta M = 530,4$ % $\delta\omega_r = 26,3$ %
Трифазний асинхронний двигун 4A160S6УЗ $2p = 6, m = 3$ $U_n = 380$ В $P_n = 11$ кВт $n_n = 980$ об/хв. $M_n = 108$ Н·м $J_p = 0,14$ кг·м ² $J = 1,28J_p$ $J = 0,18$ кг·м ² схема обмотки статора – "зірка"	Квазісталі $J = 0,18$ кг·м ²	$M_c = const$ $M_c = 108$ Н·м	$P_2 = 8790$ Вт $\eta = 89,7$ %
	$J = 0,18$ кг·м ²	Періодична $M_{ce} = 108$ Н·м	$P_2 = 8582$ Вт $\eta = 88,4$ % $\Delta M = 120$ % $\delta\omega_r = 22$ %
	$J = 0,21$ кг·м ²		$P_2 = 10550$ Вт $\eta = 87,6$ % $\Delta M = 97,6$ % $\delta\omega_r = 17,5$ %

– наявності значних пульсацій електромагнітного моменту, частоти обертання ротора та струмів статора і ротора для шестиполюсних АД одноциліндрових компресорів: 4A80A6ВЗ – відповідно $\Delta M = 772\%$, $\delta\omega_r = 81,5\%$, $\delta I_s = 120\%$ й

$\delta i_r = 193\%$; чотириполюсних конденсаторних з малими значеннями потужності і моменту інерції (відповідно 30 Вт і $0,00003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) – $\Delta M = 500\%$, $\delta \omega_r = 134\%$, $\delta i_s = 38,4\%$;

– зниженні ККД для режимів зі змінним навантаженням в порівнянні з постійним, що дорівнює його середньому значенню за період навантаження, для шестиполюсних АД: 4A80A6B3 – на 27,3 % і 4A160S6Y3 – на 1,9%; АКД – на 9,6%; ДАО – на 0,65%.

Отримані результати розрахунків розбіжностей пульсацій кутової частоти обертання ротора і ККД (табл. 4.14) асинхронних двигунів з періодичним навантаженням ($n_u = 1$) в порівнянні з постійним навантаженням можна поділити на два діапазони. Більші значення ($\delta \omega_r = 81...136\%$, $\eta = 10...27\%$) відповідають трифазному шестиполюсному 4A80A6B3 (700 Вт, $J = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) і чотириполюсному конденсаторному АД (30 Вт, $J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$). Менші значення (11% ... 14%) та (0,6%...2%) – відповідно двополюсному ДАО (100 Вт) з $J = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і трифазному шестиполюсному 4A160S6Y3 (11 кВт) з $J = 0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Наведені результати порівняльних досліджень дозволили обґрунтувати заходи з підвищення ефективності робочих режимів АД зі змінним навантаженням: *вибір моменту інерції* приводу, що забезпечує необхідні пульсації частоти обертання ротора і струмів та підвищує ККД у квазісталих режимах; *вибір оптимальної ємності робочого конденсатора*, яка забезпечує максимальне значення ККД в робочих режимах з врахуванням навантаження; *вдосконалення двигунів* шляхом їх оптимального проектування для умов змінного навантаження. Встановлено, що при збільшенні моменту інерції 4A80A6B3 ($k_{кр} = 0,49$) з пульсуючим навантаженням (що характерно для насосів і двоциліндрових компресорів) у 5 разів згідно умові $k_{кр} > 2$ (4.6) можна підвищити ККД двигуна на 15,8%, практично до його номінального значення у сталому режимі (73,9) та знизити ступінь пульсацій частоти обертання в

4 рази (рис. 4.17) [31]. Однак, дане технічне рішення супроводжується суттєвим збільшенням масо-габаритних показників.

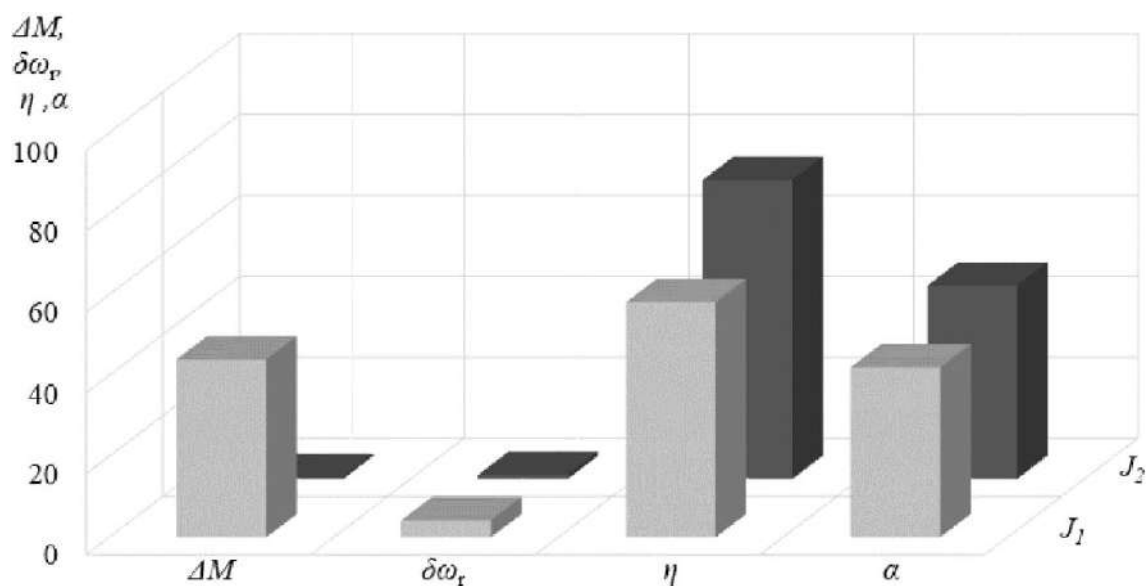


Рис. 4.17 Гістограма показників квазісталих режимів 4A80A6УЗ з пульсуючим навантаженням для моментів інерції J_1 і J_2

У випадку одноциліндрового компресора традиційний підхід ні є ефективним, оскільки при збільшенні моменту інерції у п'ять разів ККД можна підвищити лише до 56,1 % наближаючись до його значення, що відповідає робочому режиму з пульсуючим навантаженням (рис. 4.18).

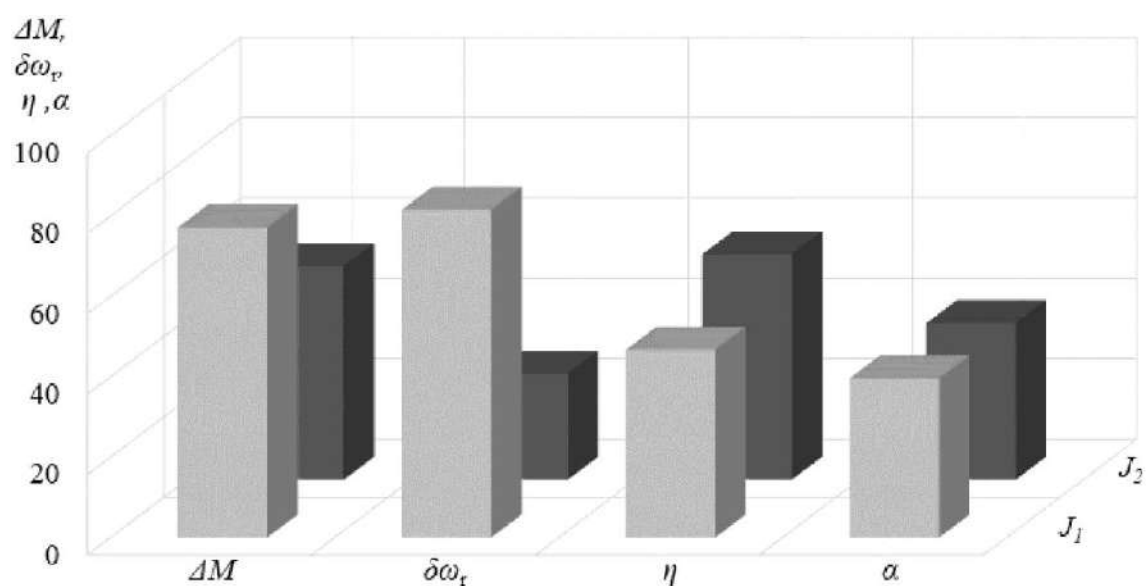


Рис. 4.18 Гістограма показників квазісталих режимів 4A80A6УЗ з періодичним навантаженням для моментів інерції J_1 і J_2

Показники квазісталих режимів двигуна 4A160S6Y3 з періодичним навантаженням при зміні моменту інерції у 1,2 рази показано на рис. 4.19.

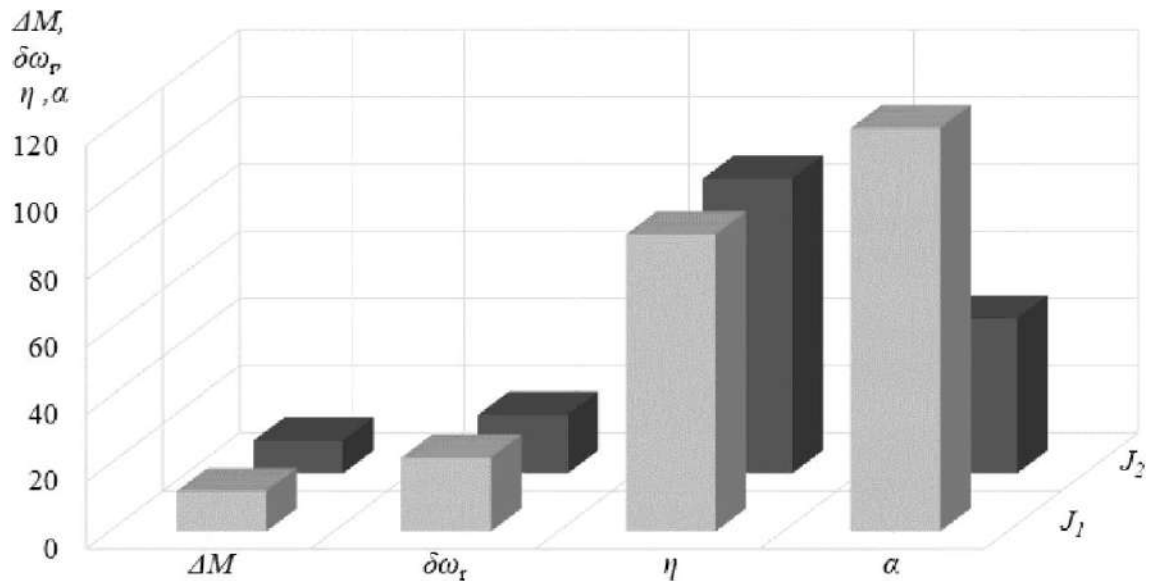


Рис. 4.19 Гістограма показників квазісталих режимів 4A160S6Y3 з періодичним навантаженням для моментів інерції J_1 і J_2

Для даного АД з моментом інерції приводу $J_1 = 0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і малим значенням критичного ковзання ($s_k = 0,15$) відхилення по ККД – $\Delta\eta = 2 \%$, $\delta\omega_r$ – в межах 17,5...22 % [31]. Це підтверджує необхідність проектування АД для відкритих поршневих компресорів із забезпеченням допустимого значення пульсацій частоти обертання ротора [172] – у межах 1...2 %.

4.8 Дослідження впливу періодичного навантаження на ККД і пульсації електромагнітного моменту й кутової частоти ротора АД з частотним регулюванням за зміни ступеня його завантаження

Ефективність застосування комплексного проектування АД ПК з урахуванням особливостей навантаження залежить від типорозміру, конструкції АД. Селекцію нерегульованих АД, для яких даний засіб підвищення енергоефективності є доцільним, рекомендовано здійснювати за критерієм інтенсивних квазісталих режимів $k_{кр}$ [31].

Із зростанням кінетичної енергії ротора доцільність застосування комплексного проектування зменшується. Але, якщо у нерегульованому режимі ряду типорозмірів АД комплексне проектування не є ефективним, то при їх частотному регулюванні (кінетична енергія зменшується пропорційно квадрату швидкості) врахування особливостей періодичного навантаження може суттєво підвищити енергоефективність. Враховуючи, що застосування регульованих електроприводів (асинхронних з перетворювачами частоти), тощо) для компресорів холодильних машин є ефективним засобом підвищення їх енергоефективності, задача комплексного проектування АД з урахуванням періодичного навантаження є актуальною. При цьому важливими є питання оцінки динамічних параметрів і визначення критеріїв підвищення ефективності регульованих АД з ПЧ. Для оцінки можливості підвищення ефективності робочих режимів АД з ПЧ пропонується використовувати критерій інтенсивних квазісталих режимів $k_{кр}$ [214].

Метою досліджень є оцінка впливу періодичного навантаження на характеристики режимів роботи (ККД і пульсації електромагнітного моменту й кутової частоти ротора) АД з частотним регулюванням поршневих одноциліндрових компресорів за зміни частоти і напруги живлення та ступеня його завантаження, а також обґрунтування використання критерію інтенсивних квазісталих режимів при визначенні доцільності розробки додаткових рекомендацій з підвищення ефективності робочих режимів.

Об'єкт дослідження – трифазний двополюсний АД потужністю 550 Вт частото-регульованого приводу поршневого одноциліндрового компресору. Для комплексного дослідження режимів роботи АД приводу компресора за періодичної зміни моменту навантаження в залежності від кута повороту ротора використана математична модель (рис. 2.5), що представлена в розділі 2. Чисельний експеримент виконано із моментом інерції приводу $J=0,00135 \text{ Нм}^2$ при варіюванні максимумом залежності $M_c = f(\theta)$ та частоти живлення (у діапазоні 15 ... 50 Гц) за зміни напруги згідно співвідношення $U = U_n \cdot (1 + (50 - f)/175) \cdot f/50$ [214].

Результати чисельного експерименту зведено до табл. И.1 Додатку И. Приклад динамічних характеристик квазісталого режиму роботи двигуна 4A63B2Y3 при частоті живлення 15 Гц, коли навантаженням є герметичний одноциліндровий поршневий компресор при максимумі моменту опору 4 Нм, наведено на рис. 4.20.

Часові залежності зміни миттєвих значень моменту опору M_c , корисного моменту на валу АД $M_2(\theta)$ і його середнього значення $M_{2cp}(\theta)$ (рис. 4.20 а), кутової частоти обертання ротора АД (рис. 4.20 б) показують, що зменшення частоти обертання ротора починається після перевищення моменту опору над моментом двигуна, а її більшення – навпаки.

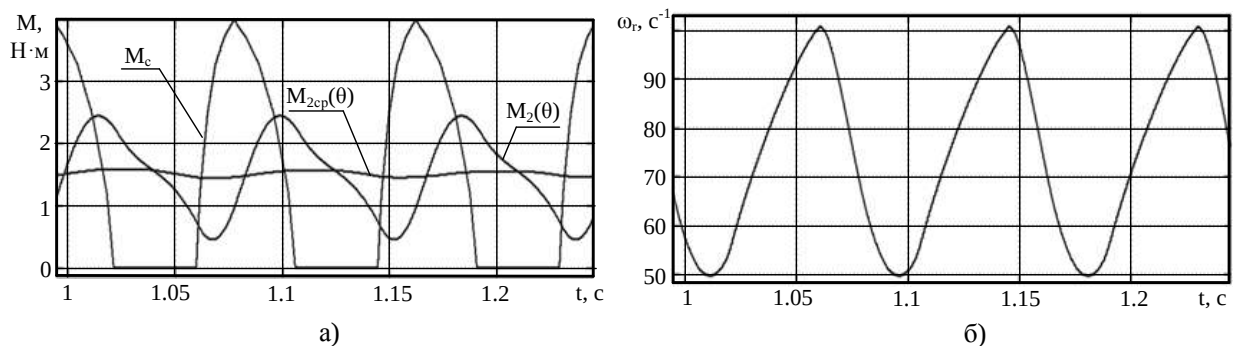


Рис. 4.20 Динамічні характеристики квазісталого режиму роботи двигуна 4A63B2Y3 ГПК при частоті живлення 15 Гц

У свою чергу, момент двигуна збільшується із зменшенням частоти обертання ротора, а зменшується – навпаки.

Розглянутий режим роботи при частоті живлення 15 Гц характеризується відносними пульсаціями моменту 155,1% і кутової швидкості обертання 76 %, що призводить до зростання втрат та зниження ККД на 9,47 %. Показники пульсацій наведено у табл. И 1 Додатку И. Слід відмітити, що в номінальному режимі АД 4A63B2Y3 для частоти живлення 50 Гц, при розрахунках за виразом (4.4), критерій інтенсивних квазісталих режимів $k_{kp}=3,9$, що характеризує (відповідно до умови $k_{kp}>2$, згідно [29]) відсутність резонансу у межах частотної характеристики двигуна (коли амплітуда електромагнітного моменту $M_2(\theta)$ перевищує амплітуду моменту опору $M_c(\theta)$). Розрахунок величини критерію (4.7) в умовах зміни частоти живлення (для значень табл. И1 Додаток И) здійснено з урахуванням інформації про зміну

величин критичних ковзання і моменту. Ці значення отримано з результатів розрахунку механічних характеристик для частот живлення 50, 40, 30, 25, 23, 20, 18, 15 Гц, які вказано на рис. 4.21. Графічна залежність зміни величини критерію $k_{кр}$ із зміною частоти живлення показана на рис. 4.21 разом із сукупністю залежностей $\Delta\eta$.

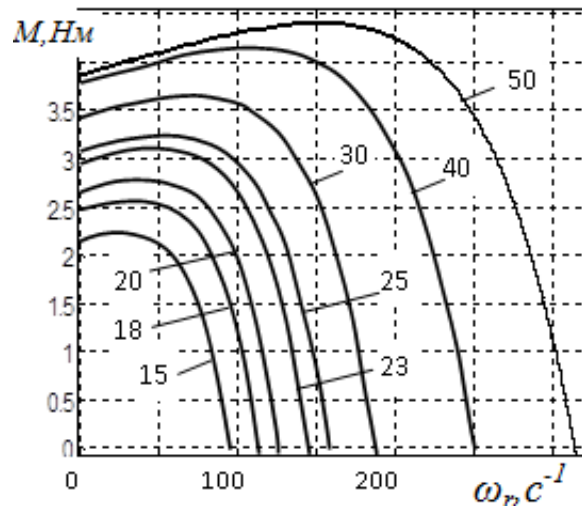


Рис. 4.21 Механічні характеристики двигуна 4A63B2Y3 для різних частот живлення

Як видно з рис. 4.22, при частотах живлення АД 4A63B2Y3 менших за критичну величину $f_k = 28$ Гц значення критерію інтенсивних квазісталих режимів $k_{кр} = T_{МК} / T_E$ стає меншим за граничне значення 2,0 [31]. Це корелюється із збільшенням інтенсивності зниження ККД у робочих режимах (табл. И1).

Лінія, що з'єднує критичні значення частоти на рис.4.22 а, забезпечує обґрунтування доцільності використання запропонованого критерію для розроблення заходів по підвищенню енергоефективності у робочих режимах регульованих АД з періодичним навантаженням. Сімейства графічних залежностей зміни критеріїв $\Delta\eta$, $\delta\omega_r$, ΔM у функції частоти живлення для різного ступеня завантаження $k_z = M_{2cp}(\theta) / M_{2н}$ (розраховано за даними табл. И1 та використано для позначень графіків) наведено на рис 4.22 і рис. 4.23. Видно, що із збільшенням ступеня завантаження АД зниження ККД і пульсації частоти обертання досягають

критичного рівня при меншому діапазоні зміни частоти живлення, а величина пульсацій моменту мало залежить від ступеня завантаження.

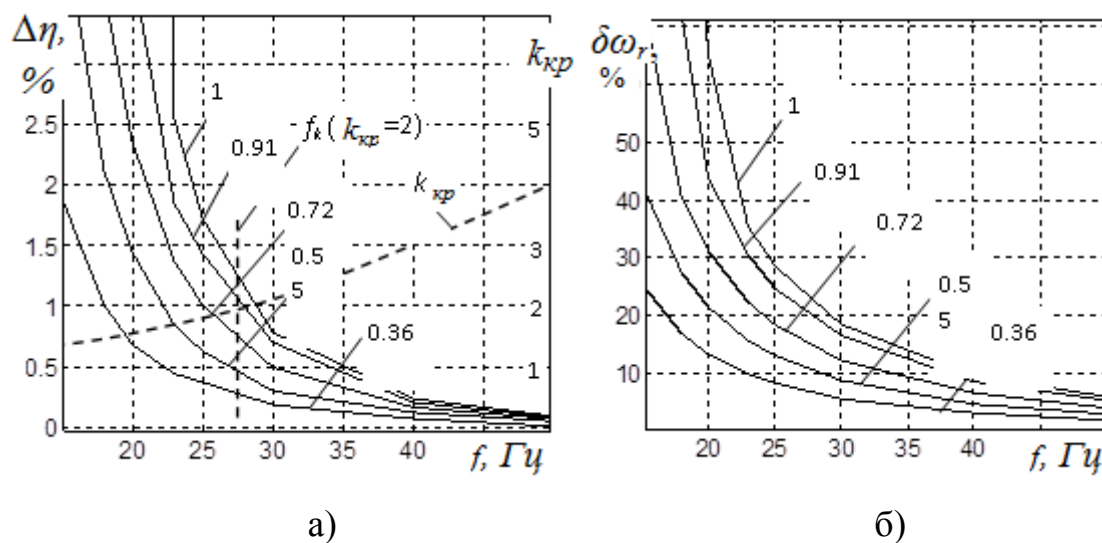


Рис. 4.22 Графічні залежності зміни $\Delta\eta$, $\delta\omega_r$ та k_{kp} із зміною частоти живлення для різного ступеня завантаження двигуна 4A63B2Y3

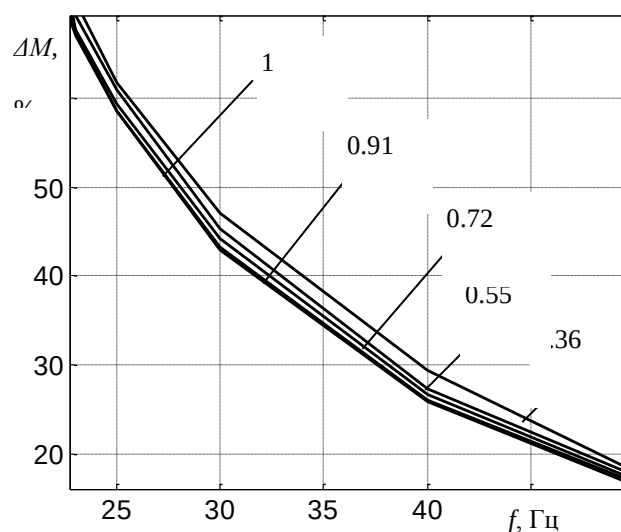


Рис. 4.23 Графічні залежності зміни пульсації корисного моменту на валу двигуна 4A63B2Y3 із зміною частоти живлення

Дослідження, що виконано, показали доцільність і можливість формування характеристик АД з перетворювачами частоти (із забезпеченням обмеження пульсацій частоти обертання ротора АД одноциліндрових компресорів на рівні 20 % [214]), наприклад, в діапазоні регулювання частоти обертання двигуна 1:3,5 для

ступеня завантаження 0,36 (що відповідає максимуму моменту опору 2 Нм) та в діапазоні 1:1,8 – для ступеня 1,0 (максимум 5,5 Нм). Розраховано максимальну різницю у визначенні ККД для періодичного і еквівалентного сталого навантаження ($\Delta\eta = 27,3\%$), що відповідає робочому режиму з $k_s = 0,91$ і $f = 18$ Гц.

Посилання [7, 12, 13 – 16, 18, 19, 21, 26, 31, 90, 91, 111, 116, 129, 172, 214] див. список використаних джерел стор. 275 – 299.

4.9 Висновки до розділу 4

1. З метою селекції нерегульованих АД, для яких комплексне проектування з урахуванням особливостей навантаження є доцільним для підвищення енергоефективності режимів роботи, запропоновано критерій інтенсивних квазісталих режимів, який розраховується як відношення механічної постійної двигуна до електромагнітної, залежить від числа пар полюсів, критичних значень моменту і ковзання, моменту інерції привода. За допомогою даного критерію проведено аналіз серійних дво - , чотири - та шестиполюсних АД у діапазоні потужностей 60 Вт ... 11 кВт.

2. Обгрунтовано необхідність розрахунку показників асинхронних двигунів в квазісталих режимах з врахуванням періоду повторювання, що визначається як часовий інтервал між двома сусідніми моментами збігу в часі максимумів електромагнітного моменту і моменту навантаження. Це обумовлено наявністю розбіжності результатів розрахунків, що виникає при заміні квазісталих режимів сталими і складає для АД ротаційного компресора 10 %.

3. Підтверджено адекватність математичного моделювання квазісталих режимів АД шляхом порівняння результатів чисельних розрахунків робочих режимів трифазного дво полюсного асинхронного двигуна АИВ71А2Ф2 потужністю 370Вт з даними його експериментальних досліджень у складі поршневих двоциліндрових компресорів ВС-400 й ВС-800. Розбіжність результатів не перевищує 2%.

4. За допомогою удосконалених математичних моделей досліджено закономірності зміни часових залежностей частоти обертання ротора, струмів, електромагнітних моментів трифазних та однофазних АД (за різними значеннями потужності і числа пар полюсів) з навантаженням, характерним для одно - і двоциліндрових поршневих компресорів.

Уточнено відносні пульсації частоти обертання ротора $\delta\omega_r$, струмів статора δi_s і ротора δi_r , електромагнітних моментів ΔM двигунів та визначено відхилення їх ККД за періодичного навантаження в порівнянні з його постійним середнім значенням за період навантаження $\Delta\eta$. Найбільші їх значення відповідають одноциліндровим компресорам з шестиполюсним двигуном 4A80A6B3 ($\delta\omega_r = 81,5\%$, $\delta i_s = 120\%$, $\delta i_r = 193\%$, $\Delta M = 772\%$ та $\Delta\eta = 27,3\%$) та з чотириполюсним конденсаторним АД потужністю 30 Вт ($\Delta M = 500\%$, $\delta\omega_r = 134\%$, $\delta i_s = 38,4\%$, $\Delta\eta = 9,6\%$).

5. Встановлена можливість підвищення ККД асинхронних двигунів при збільшенні моменту інерції приводу, що відповідає мінімальному значенню критерію інтенсивних квазісталих режимів, з пульсуючим навантаженням (двоциліндрових компресорів) – до номінального значення, з періодичним (одноциліндрових компресорів) – на 10%. Це доведено на прикладі розрахунку робочих режимів трифазного шестиполюсного двигуна 4A80A6Y3.

Проведені дослідження підтвердили необхідність оптимального проектування трифазних і конденсаторних АД для поршневих компресорів з врахуванням періодичного навантаження та використання інших енергоефективних ЕМПЕ, вентильно-індукторних двигунів тощо.

6. Вперше виявлено з використанням критерію інтенсивних квазісталих режимів, який запропоновано для оцінки протікання електромагнітних і електромеханічних процесів, області критичного зниження ККД (більш ніж на 10%) нерегульованого і частото-регульованого асинхронних двигунів поршневих одноциліндрових компресорів. Це обґрунтовує необхідність розробки заходів з підвищення енергоефективності двигунів в робочих режимах.

7. Обґрунтовано ефективне використання однофазних асинхронних дво полюсних двигунів з синусними обмотками статора, з робочим і пусковим конденсаторами у складі герметичних поршневих компресорів. На прикладі АД потужністю 100 Вт виявлено незначне зниження ККД (на 1,5%) в номінальних режимах в порівнянні з постійним навантаженням за зміни ємності робочого конденсатора від номінального значення C_n до $1,5 \cdot C_n$ ($C_n = 3,3$ мкФ).

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

З метою оцінки ефективності використання вентильно-індукторних двигунів у складі поршневих компресорів, насосів, верстат-гойдалок із забезпеченням технічних вимог проведено чисельні і експериментальні дослідження їх основних властивостей і показників у квазісталих режимах. Виконано оцінку ступеня адекватності математичного моделювання ВІД шляхом порівняння результатів чисельних досліджень з експериментальними даними дослідного зразка ВІД. Уточнено закономірності протікання електромагнітних і електромеханічних процесів з врахуванням навантаження, проведено аналіз особливостей режимів вентильно-індукторних двигунів компресорів і насосів та сформовано характеристики з підвищення енергоефективності їх робочих режимів за зміни напруги живлення, кутів комутації та моменту навантаження.

Розглянуто ВІД базової конфігурації з числом зубців статора і ротора 6/4 з симетричною комутацією фаз.

5.1 Чисельні дослідження квазісталих режимів ВІД поршневих компресорів

Досліджено вплив навантаження поршневих одно – і двоциліндрових компресорів, зміни напруги живлення і кутів комутації на пульсації електромагнітного моменту і частоти обертання ротора ВІД, що розроблений на основі асинхронного двигуна типу ДАО (табл. 3.1). Використано [199] стандартний блок SRM імітаційної моделі "Generic model" бібліотеки SimPowerSystems з комутатором за схемою асиметричного моста. Вихідні дані для математичної моделі ВІД: індуктивність обмотки статора по поздовжній осі $L_d = 0,674$ Гн; індуктивність по поперечній осі $L_q = 0,076$ Гн; активний опір фазної обмотки статора $R_\phi = 10,2$

Ом; струм керування $I_{кер} = 1,6$ А; момент інерції привода $J = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Індуктивність обмотки статора по поздовжній осі розраховано як [135]

$$L_d = (G_d)_e \cdot w_{1e}^2, \quad (5.1)$$

де $(G_d)_e$ - еквівалентна провідність на одну пару полюсів для потоку, що створений обмоткою статора з ефективним числом витків $\cdot w_{1e}$, коли вісь ротора співпадає з віссю обмотки статора (при узгодженому положенні). Значення еквівалентної провідності розраховано за формулою

$$G_d \cdot \approx \mu_0 \frac{k_f b_{zr} h_{zr}}{k_\mu k_\delta 2\delta}, \quad (5.2)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м}$; k_μ - коефіцієнт насичення магнітного ланцюга, що враховує зменшення провідності завдяки магнітному опору феромагнітних ділянок (сталі); k_δ - коефіцієнт зубчатості, що враховує зменшення провідності завдяки зубчатості статора, $k_\delta \approx 1,2 \dots 1,4$; k_f - коефіцієнт, що враховує крайовий ефект, $k_f \approx 1,1 \dots 1,3$.

Показники квазісталих режимів ВІД для напруги ланки постійного струму $U_d = 200$ В за зміни кутів вмикання $\theta_{вм}$ і вимикання $\theta_{вим}$ при постійному і періодичному навантаженні наведено в табл. 5.1 і табл. 5.2 відповідно для одноциліндрового ($n_\psi = 1$) і двоциліндрового ($n_\psi = 2$) компресорів [22].

Таблиця 5.1

Показники квазісталих режимів ВІД одноциліндрового компресора за зміни кутів комутації фаз при постійному і періодичному навантаженнях ($U_d = 200$ В)

Тип навантаження	$M_{ср}$ Нм	$\theta_{вм}^\circ$	$\theta_{вим}^\circ$	Показники квазісталих режимів							
				$\omega_{ср}$ рад/с	$\omega_{макс}$ рад/с	$\omega_{мин}$ рад/с	$\delta\omega_r$ %	$M_{ср}$ Нм	$M_{макс}$ Нм	$M_{мин}$ Нм	ΔM %
$M_c = const$	0,27	20	50	402	402	402	0	0,293	0,346	0,21	46,4
$M_c = f(\theta)$	0,27	12	42	632,8	648	628	3,1	0,334	0,39	0,26	38,3
	0,25	15	45	501	510	490	4,0	0,31	0,4	0,285	36,3
	0,28	20	50	411,2	426	407	4,6	0,296	0,345	0,288	47,3

Таблиця 5.2

Показники квазісталіх режимів ВІД двоциліндрового компресора за зміни кутів комутації фаз при постійному і періодичному навантаженнях ($U_d = 200$ В)

Тип навантаження	$M_{ср}$ Нм	$\theta_{вм}^\circ$	$\theta_{вим}^\circ$	Показники квазісталіх режимів							
				$\omega_{ср}$ рад/с	$\omega_{макс}$ рад/с	$\omega_{мін}$ рад/с	$\delta\omega_r$ %	$M_{ср}$ Нм	$M_{макс}$ Нм	$M_{мін}$ Нм	ΔM %
$M_c = const$	0,518	12	42	405	405	405	0	0,518	0,64	0,4	46,3
$M_c = f(\theta)$	0,518	12	42	421,2	425	413	2,8	0,503	0,618	0,4	43,3
	0,526	15	45	390,2	401	389	3,0	0,526	0,6	0,45	27,5
	0,50	20	50	292	300,4	283,4	5,8	0,50	0,6	0,38	44

В результаті чисельних розрахунків визначено кути вмикання ($\theta_{вм} = 15^\circ$) і вимикання ($\theta_{вим} = 45^\circ$), які забезпечують мінімальні пульсації електромагнітного моменту ($\Delta M = 36,3\%$ для $n_y = 1$ і $\Delta M = 27,5\%$ для $n_y = 2$) та пульсації частоти обертання не більш 4%. Максимальні значення ΔM відповідають кутам комутації $\theta_{вм} = 20^\circ$ і $\theta_{вим} = 50^\circ$, часові залежності результуючого моменту (жирні лінії) і струмів фаз (тонкі лінії) цього режиму для двоциліндрового компресора зображені на рис. 5.1

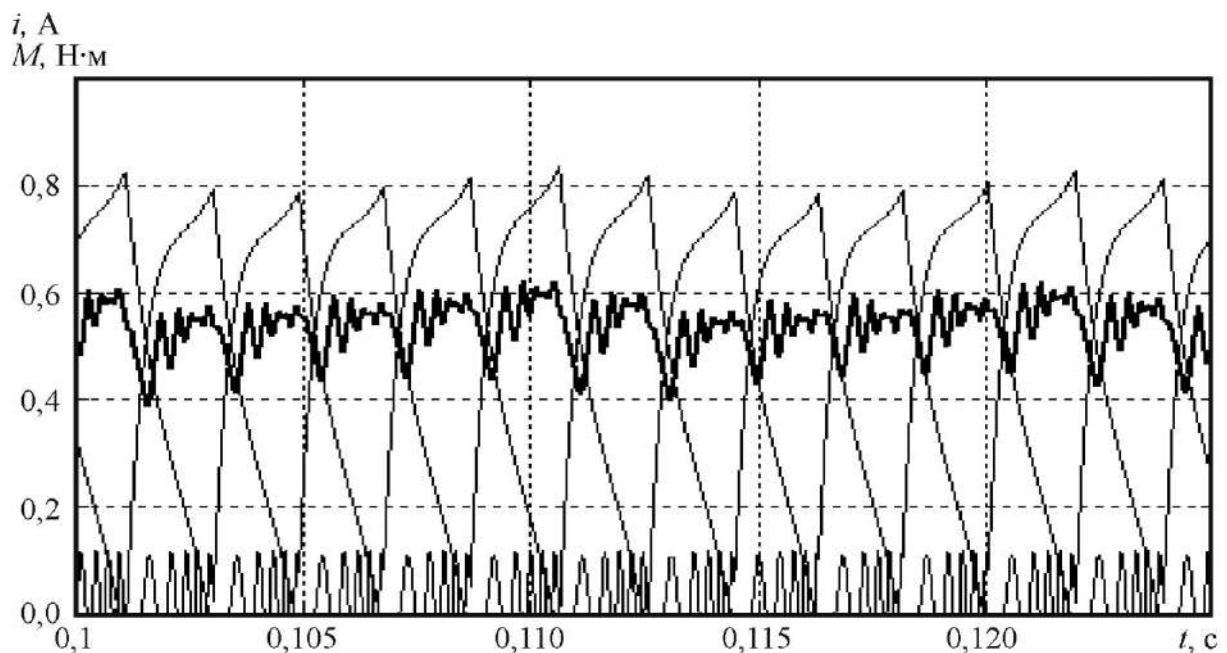


Рис. 5.1 Часові залежності струмів фаз і електромагнітного моменту ВІД ПК, $n_y = 2$,

$$M_c = f(\theta), \theta_{вм} = 20^\circ, \theta_{вим} = 50^\circ, U_d = 200 \text{ В}$$

В табл. 5.3 наведено результати досліджень пульсацій електромагнітного моменту і частоти обертання ВІД для $U_d = 100 \text{ В}$ з кутами комутації ($\theta_{\text{вм}} = 20^\circ$ і $\theta_{\text{вим}} = 50^\circ$), що відповідають найбільшим значенням ΔM для $U_d = 200 \text{ В}$ (див. табл. 5.1 і 5.2). Для порівняння результатів досліджень ВІД одноциліндрового та двоциліндрового компресорів представлено розрахунки їх режимів з постійними значеннями моментів опору, що дорівнюють середнім значенням ($M_{\text{ср}}$) періодичних моментів ПК – $0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ($n_y = 1$) і $0,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ($n_y = 2$).

Таблиця 5.3

Результати чисельних досліджень квазісталих режимів ВІД поршневих компресорів при різних типах навантаження ($U_d = 100 \text{ В}$)

Навантаження	$M_{\text{ср}}$ Нм	Показники квазісталих режимів							
		$\omega_{\text{ср}}$ рад/с	$\omega_{\text{макс}}$ рад/с	$\omega_{\text{мин}}$ рад/с	$\delta\omega_r$ %	$M_{\text{ср}}$ Нм	$M_{\text{макс}}$ Нм	$M_{\text{мин}}$ Нм	ΔM %
$M_c = \text{const}$	0,32 ($n_y = 1$)	199,2	199,2	199,2	0	0,33	0,345	0,31	10,6
	0,5 ($n_y = 2$)	140	140	139,5	0	0,5	0,5	0,45	21,1
$M_c = f(\theta)$	0,32 ($n_y = 1$)	220,9	238,5	200	17,4	0,284	0,32	0,24	28,2
	0,5 ($n_y = 2$)	140	155	123	23	0,5	0,67	0,4	54,0

Часові залежності струмів фаз $i = f(t)$, результуючого моменту $M = f(t)$, частоти обертання ротора $\omega_r = f(t)$ ВІД для напруги $U_d = 100 \text{ В}$, кутів вмикання $\theta_{\text{вм}} = 20^\circ$ і вимикання $\theta_{\text{вим}} = 50^\circ$ одноциліндрового компресора ($n_y = 1$) наведено на рис. 5.2 – рис. 5.5 (струми фаз зображено тонкими лініями, результуючий момент ВІД – жирними лініями).

Аналіз результатів чисельних досліджень квазісталих режимів ВІД поршневих компресорів показав, що вплив характеру навантаження на відносні пульсації моменту при номінальній напрузі $U_d = 200 \text{ В}$ (таб. 5.1 і табл.5.2) незначний (різниця при визначенні ΔM у діапазоні 1..3%).

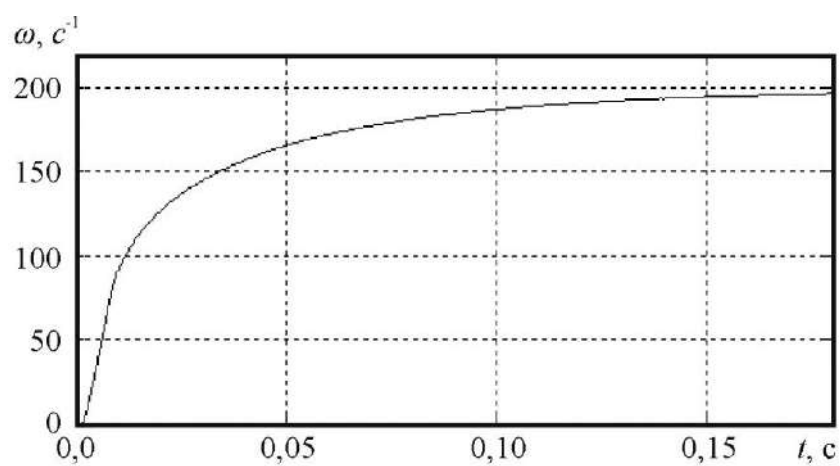


Рис. 5.2 Залежність $\omega_r = f(t)$ ВІД, $n_u = 1$, $M_c = \text{const}$

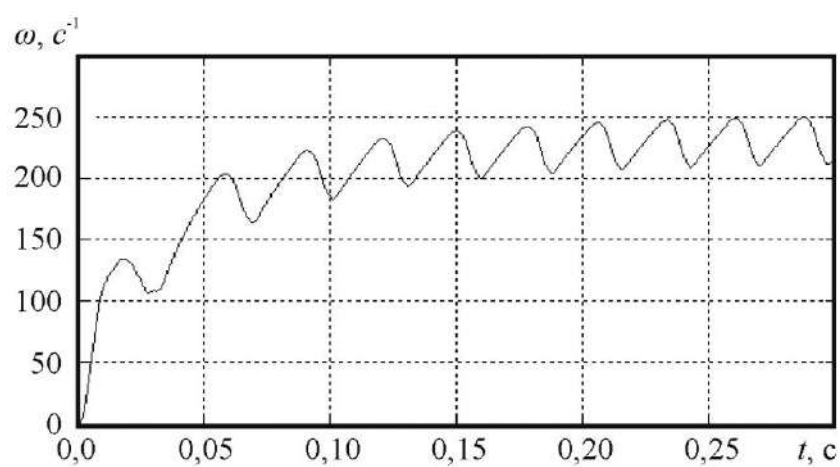


Рис. 5.3 Залежність $\omega_r = f(t)$ ВІД ПК, $n_u = 1$, $M_c = f(\theta)$

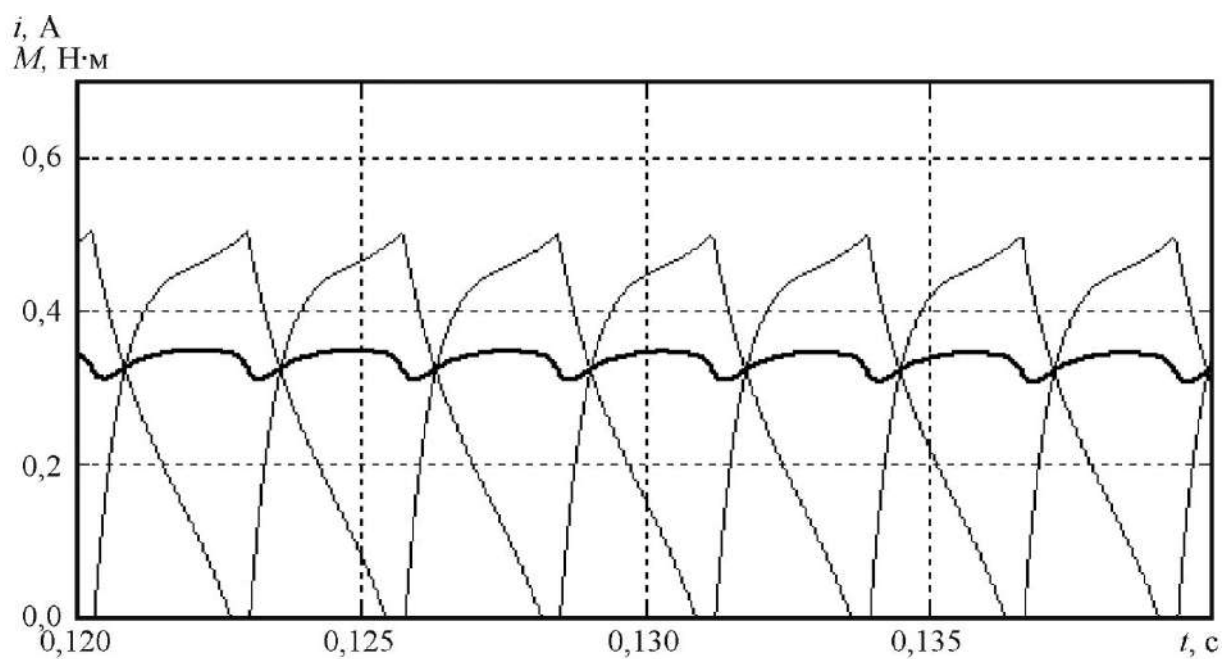


Рис. 5.4 Залежності $i = f(t)$ і $M = f(t)$ ВІД, $n_u = 1$, $M_c = \text{const}$

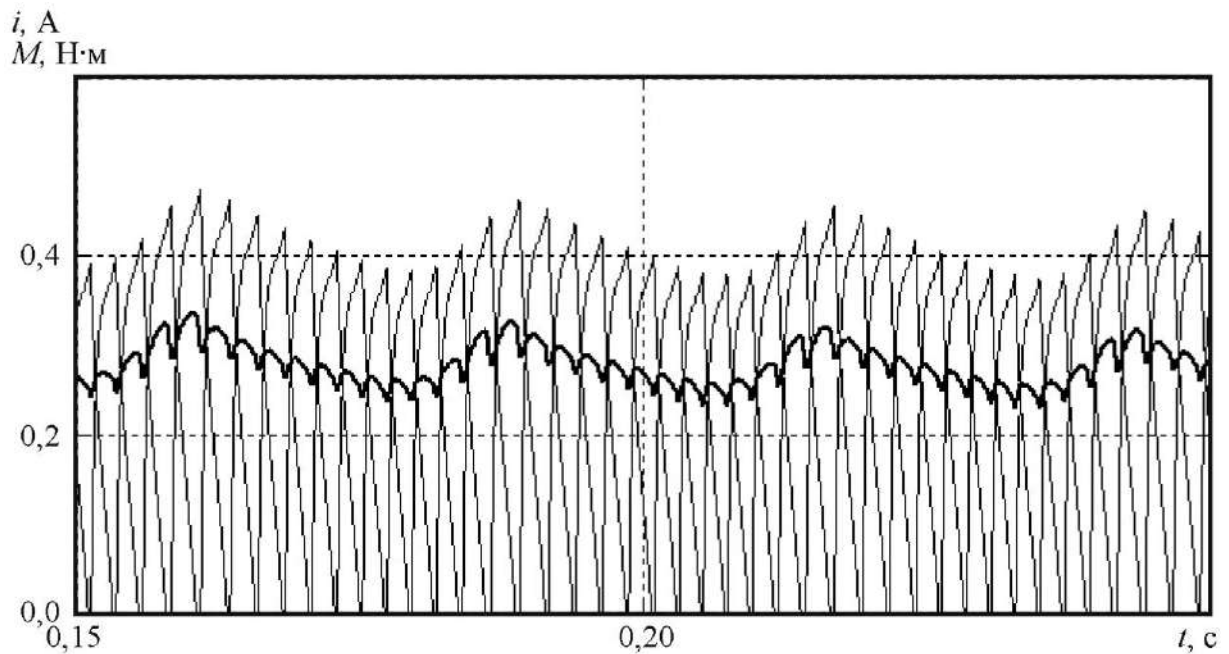


Рис. 5.5 Залежності $i = f(t)$ і $M = f(t)$ ВІД $n_y = 1$, $M_c = f(\theta)$

Однак, при зниженні напруги розбіжності результатів розрахунків режимів з періодичним і постійним навантаженням (середнім за період M_{cpr}) суттєво збільшуються. Для напруги $U_d = 100$ В (табл. 5.3), розбіжності при розрахунках пульсацій ΔM і $\delta\omega_r$ відповідно 17,6% і 17,4% для одноциліндрового 32,9% і 23% – для двоциліндрового компресорів.

Визначено, що регулювання холодопродуктивності компресорів зміною моменту навантаження (з $0,32 \text{ Н}\cdot\text{м}$ до $0,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$) шляхом перемикавання з одного циліндра на два при напрузі 200 В можливе у діапазоні 1:2 (з 632,8 рад/с до 292 рад/с), при цьому $\delta\omega_r$ змінюється від 3,1% до 5,8%. При напрузі 100 В – в межах 220,9 рад/с...140 рад/с, але при цьому $\delta\omega_r$ збільшується до 23%. Встановлено, що при регулюванні частоти обертання ВІД 1:3 (з 421 рад/с до 140 рад/с, $M_{cpr} = 0,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$) двоциліндрового компресора зміною напруги живлення (з 200В до 100В) ΔM збільшується на 25%, $\delta\omega_r$ – в 8 разів (табл. 5.2 і табл.5.3).

Відповідні залежності ВІД для напруги $U_d = 100$ В, кутів вмикання $\theta_{вм} = 20^\circ$ і вимикання $\theta_{вим} = 50^\circ$ двоциліндрового компресора ($n_y = 2$) наведено на рис. 5.6 і рис. 5.7.

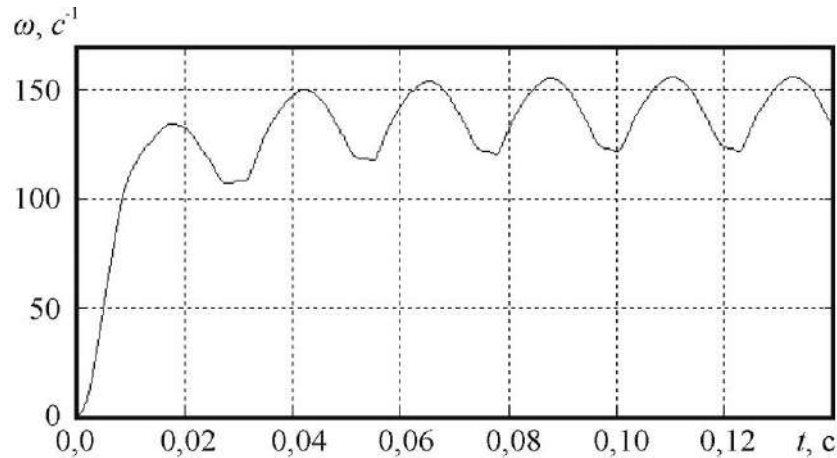


Рис. 5.6 Залежність $\omega_r = f(t)$ ВІД компресора: $n_y = 2$, $M_c = f(\gamma)$, $U_d = 100$ В

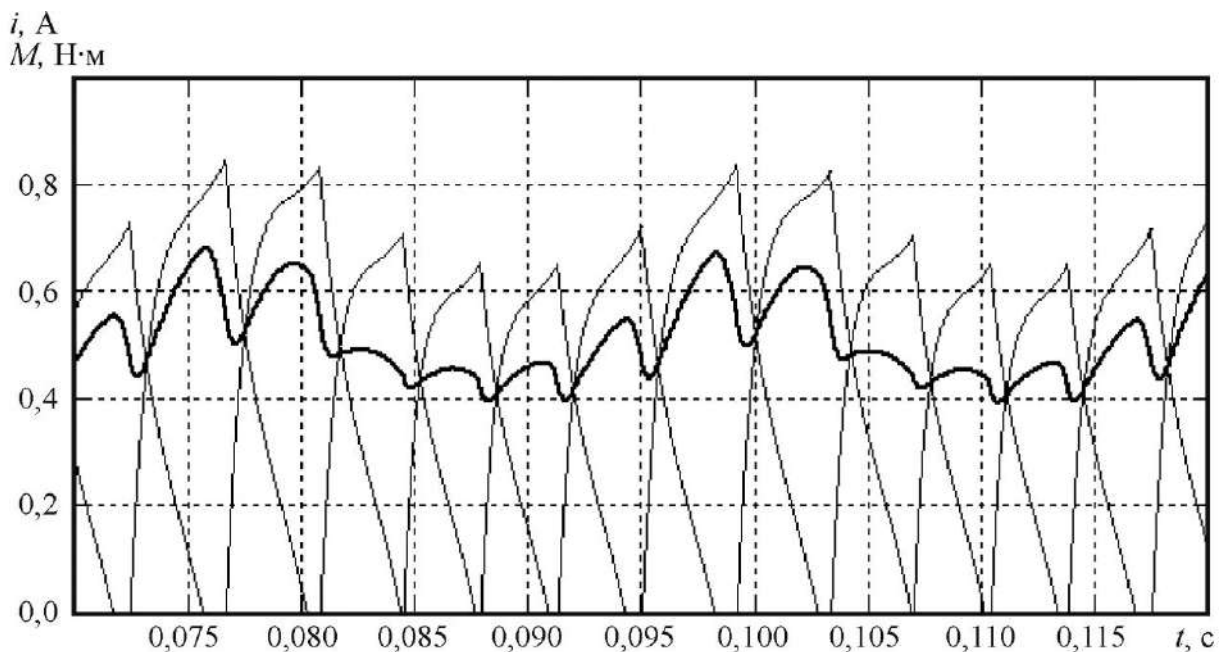


Рис. 5.7 Залежності струмів фаз і моменту ВІД: $n_y = 2$, $M_c = f(\gamma)$, $U_d = 100$ В

В результаті дослідження динамічних режимів ВІД одно- і двоциліндрового ПК визначено кратності пускових струмів $k_n = 3,0$ (для однофазних АД герметичних компресорів k_n змінюється від 6,5 до 11,5 в залежності від схеми обмотки, див табл.1.1), що менше у 2...4 рази у порівнянні з асинхронним приводом ГПК і дозволяє знизити втрати у перехідних режимах. Показано, що, крім того, ВІД мають можливість працювати у робочих режимах (для номінального моменту

навантаження) на частотах обертання більш, ніж номінальні, що є сприятливим для технологічного обладнання холодильних агрегатів, насамперед, для реалізації ефективного режиму заморозки.

Досліджено динамічні режими ВІД одноциліндрового компресора при напрузі $U_d = 150$ В і симетричної парної комутації. Встановлено ($\theta_{\text{вм}} = 12$ град, $\theta_{\text{вим}} = 50$ град, табл. 5.4) збільшення пульсацій моменту у два рази ($\Delta M = 62,7\%$) в порівнянні з симетричною одиночною комутацією ($\theta_{\text{вм}} = 12^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 42^\circ$), а також незначний (до 5%) вплив періодичного характеру навантаження на величину цих пульсацій.

Таблиця 5.4

Пульсації електромагнітного моменту і частоти обертання ротора ВІД одноциліндрового компресора у випадку симетричної парної комутації ($U_d = 150$ В)

Тип навантаження	$M_{\text{ср}}$ Нм	$\theta_{\text{вм}}^\circ$	$\theta_{\text{вим}}^\circ$	Параметри квазістатистики							
				$\omega_{\text{ср}}$ рад/с	$\omega_{\text{макс}}$ рад/с	$\omega_{\text{мин}}$ рад/с	$\delta\omega_r$ %	$M_{\text{ср}}$ Нм	$M_{\text{макс}}$ Нм	$M_{\text{мин}}$ Нм	ΔM %
$M_c = \text{const}$	0,32	12	50	420,2	420,3	420,1	0	0,342	0,45	0,235	67,2
$M_c = f(\theta)$	0,37	12	50	434,2	446	420	6,0	0,322	0,64	0,4	62,7

Проведено оцінку результатів розрахунку пульсацій моменту і частоти обертання ВІД (табл. 3.1) у квазісталих режимах з врахуванням "вентиляторного" моменту навантаження згідно (2.1) з $M_{\text{ср}} = 0,54$ Н·м. Дослідження проведено за допомогою розробленої математичної моделі (див. рис. 3.6) з нелінійними вихідними параметрами $\psi_\phi^*(i_\phi, \theta)$ і $M(i_\phi, \theta)$ (див. рис. 3.7 і рис. 3.8) [20, 30] і математичної моделі [199] "Generic model" бібліотеки SimPowerSystems (п. 5.1). Результати наведено в табл. 5.5. Момент інерції $J = 0,001$ кг·м², кути комутації $\theta_{\text{вм}} = 50$ град, $\theta_{\text{вим}} = 80$ град.

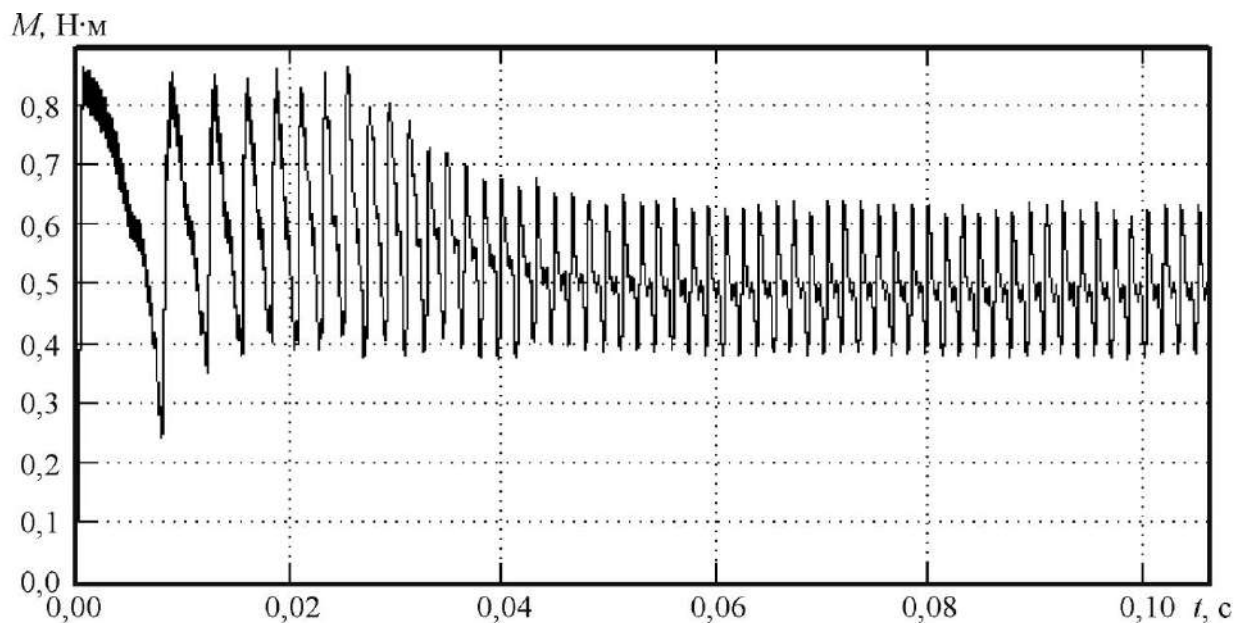
Часові залежності сумарного моменту ВІД з $M_c = k \cdot \omega_r^2$ представлено на рис. 5.8. Результати досліджень показали (табл. 5.5), що використання нелінійних залежностей $\psi_\phi^*(i_\phi, \theta)$ і $M(i_\phi, \theta)$ [20, 30] дозволяє уточнити значення відносних

пульсацій електромагнітного моменту. Пульсації частоти обертання для "вентиляторного" навантаження менш 1%.

Таблиця 5.5

Результати розрахунку показників квазісталих режимів ВІД

Параметри	Тип навантаження $M_c = k \cdot \omega_r^2$	
	польовий метод [20, 30]	енергетичний метод [199]
M_{cp} , Н·м	0,535	0,54
$M_{макс}$, Нм	0,68	0,6
$M_{мін}$, Нм	0,38	0,45
ΔM , %	55	28
ω_{cp} , рад/с	312	335,3
$\delta\omega_r$, %	0,5	0,2
P_2 , Вт	167	180

Рис. 5.8 Залежність $M = f(t)$ ВІД з $M_c = k \cdot \omega_r^2$

Досліджено залежності $M = f(t)$ та $\omega_r = f(t)$ для ВІД з періодичним навантаженням ($M_{cp} = 0,29$ Н·м) одноциліндрового компресора (рис. 5.9 і рис. 5.10). Пульсацій частоти обертання ротора і електромагнітного моменту двигуна:

$\delta\omega_r = 13\%$, $\Delta M = 51\%$. ВІД одноциліндрового компресора розвиває корисну потужність 140 Вт при середній частоті обертання ротора $\omega_{cp} = 439$ рад/с.

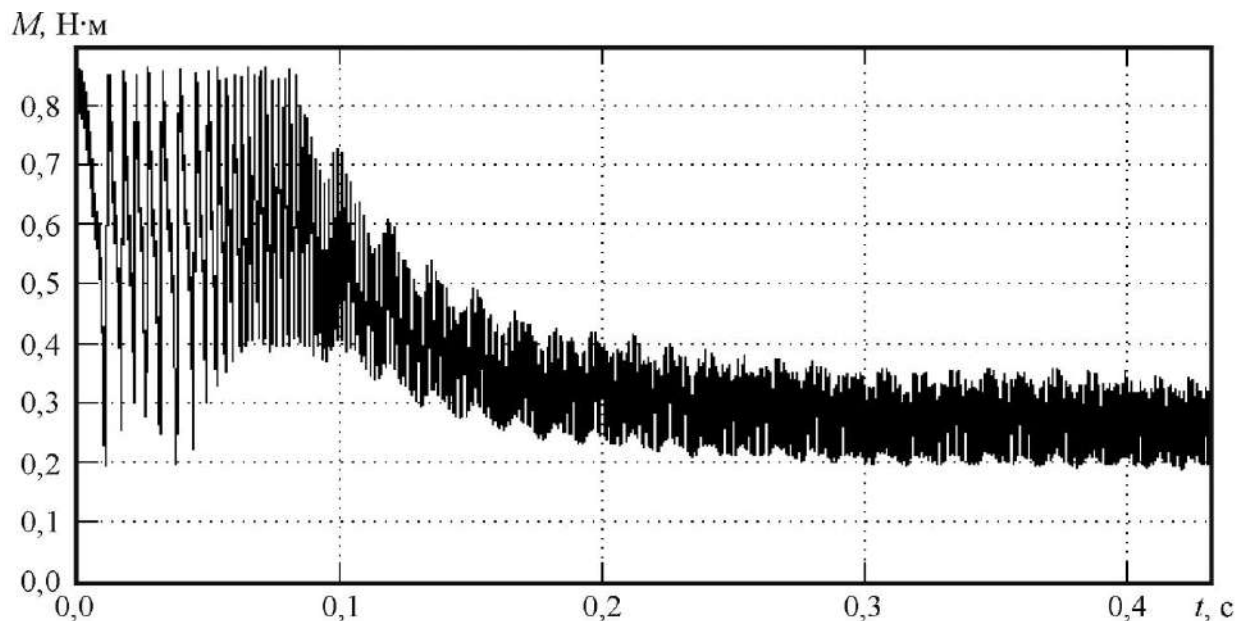


Рис. 5.9 Залежність $M = f(t)$ ВІД одноциліндрового компресора

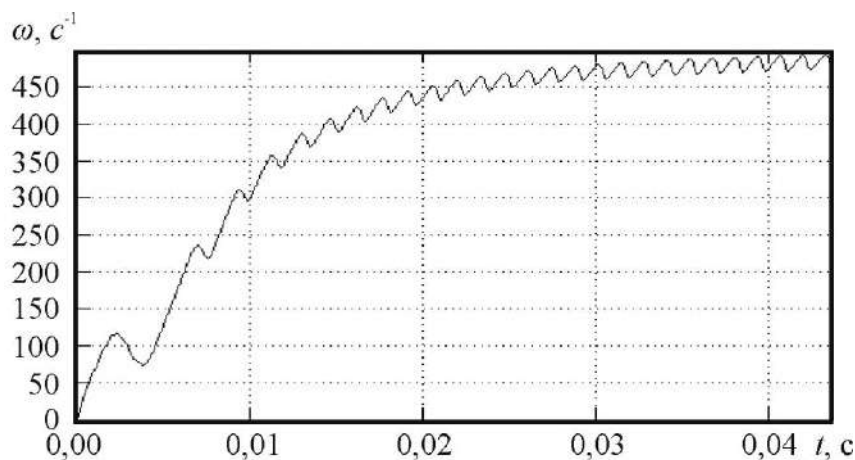


Рис. 5.10 Залежність $\omega_r = f(t)$ ВІД одноциліндрового компресора

5.2 Дослідження робочих режимів ВІД насосного обладнання

Дослідження робочих режимів ВІД здійснено за допомогою математичної моделі (рис.3.5) з комутатором за схемою асиметричного моста. Імітаційна модель блока індукторної машини (SRM) представлена на рис. 3.9. Момент навантаження циркуляційного насосу описано рівнянням (2.1). Застосовано ВІД, що спроектовано на основі асинхронного двигуна RA100M2Y3 ($P_n = 3$ кВт, $n_n = 3000$ об/х і $\eta = 83\%$,

$D_a = 140$ мм, $D_i = 63,24$ мм, $l_\delta = 95$ мм, $\delta = 0,3$ мм) при $D_a = \text{const}$ з використанням методики ескізного проектування [196]. Показники ВІД: $P_n = 3$ кВт, $n_n = 3000$ об/х, $\eta = 86\%$, $D_a = 140$ мм, $D_i = 73,28$ мм, $l_\delta = 73,5$ мм, $\delta = 0,3$ мм).

Залежності потокозчеплення (рис. 5.11) і електромагнітного моменту (рис. 5.12) фази від кута повороту ротора і фазного струму $\psi_\phi(\theta, i_\phi)$ і $M_e(\theta, i_\phi)$ двигуна отримано за польовим методом розрахунку. Електромагнітний момент розраховано через коенергію магнітного поля.

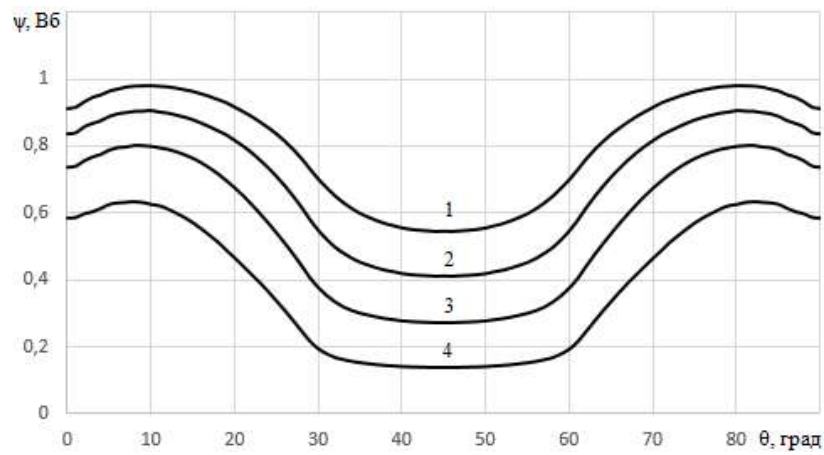


Рис. 5.11 Залежності потокозчеплення фази $\psi_\phi(\theta, i_\phi)$:

1 – $i_\phi = 16$ А; 2 – $i_\phi = 12$ А; 3 – $i_\phi = 8$ А; 4 – $i_\phi = 4$ А

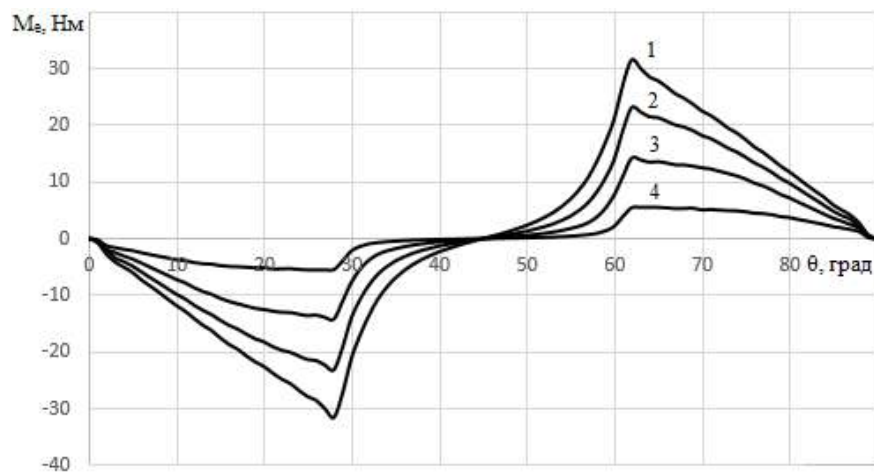


Рис. 5.12 Залежності електромагнітного моменту фази $M_e(\theta, i_\phi)$:

1 – $i_\phi = 16$ А; 2 – $i_\phi = 12$ А; 3 – $i_\phi = 8$ А; 4 – $i_\phi = 4$ А

Досліджено спосіб керуванням ВІД кутом вимикання $\theta_{\text{вим}}$ (switch-off angle control method) [227], який визначається як $\theta_{\text{вим}} = \theta_{\text{вм}} + \theta_{\text{к}}$ і реалізується за допомогою зміни кута вмикання ($\theta_{\text{вм}} = \text{var}$) при постійній зоні комутації ($\theta_{\text{к}} = 30^\circ$). Вмикання фази на напругу живлення здійснюється у момент часу, який відповідає $\theta_{\text{вм}}^\circ$, вимикання фази – при куті $\theta_{\text{вим}}^\circ$.

В результаті досліджень квазісталих режимів отримано характеристики ВІД (середні значення показників з врахуванням змінного навантаження) при напрузі на вході комутатора $U_d = 530 \text{ В}$, кутах $\theta_{\text{вм}}^\circ = 45$ і $\theta_{\text{вим}}^\circ = 75$: залежності потужності, що споживається, $P_1 = f(P_2)$ і ККД від корисної потужності $\eta = f(P_2)$ (рис. 5.13); механічну характеристику $\omega_r = f(M_c)$ (рис. 5.14); розподіл втрат в сталі та електричних втрат в обмотках статора $P_c = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ (рис. К1, Додаток К) від корисної потужності. Втрати в сталі розраховано за відомим підходом [99], механічні – за виразом (2.30) без врахування вентиляційних втрат.

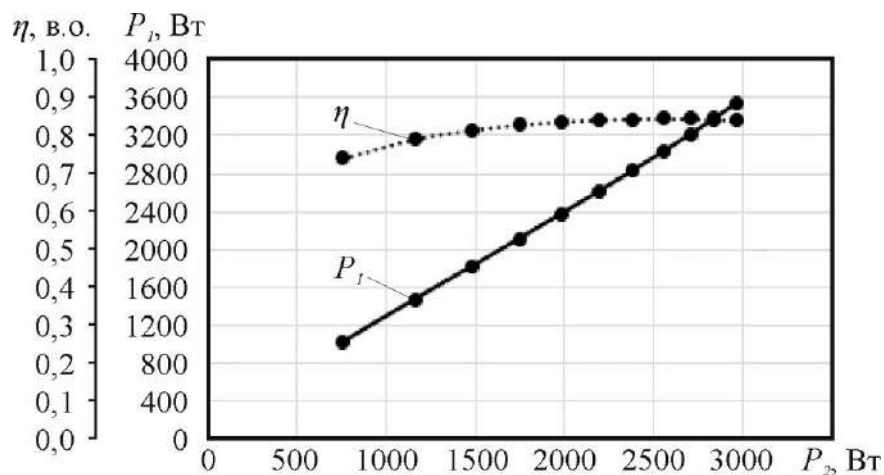


Рис. 5.13 Залежності $P_1 = f(P_2)$ та $\eta = f(P_2)$ ВІД

Завдяки м'якій механічній характеристиці ВІД є можливість регулювання частотою його обертання у необхідному діапазоні згідно вимогам технологічного обладнання з нелінійним навантаженням насосів, компресорів та верстат-гойдалок тощо.

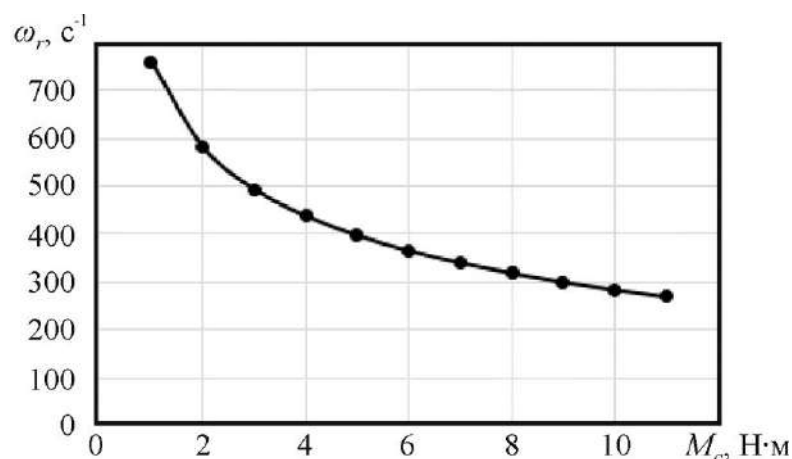


Рис. 5.14 Механічна характеристика $\omega_r = f(M_c)$ ВІД

5.2.1 Регулювання частоти обертання ВІД за зміни напруги живлення і сталих кутах комутації

Проведено дослідження характеристик насосного агрегату на основі ВІД при зміні напруги ланки постійного струму для кутів вмикання $\theta_{\text{вм}} = 45$ і $37,5$ град для середнього значення моменту навантаження $M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Результати досліджень наведено в табл. 5.9 і табл. 5.10. Отримано залежності $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ (рис. 5.15 і рис. 5.16). Залежності $P_c = f(P_2)$, $P_{\text{мех}} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ наведено в на рис. К.2 і рис.К.3 (Додаток К).

Таблиця 5.9

Результати розрахунків квазісталих режимів роботи насосного агрегату при

зміні напруги ($U_d = \text{var}$, $\theta_{\text{вм}}^\circ = 45$, $M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

ω_r , рад/с	U_d , В	P_1 , Вт	I_ϕ , А	P_a , Вт	$P_{\text{мех}}$, Вт	P_c , Вт	η , в. о.
444,01	640	3298,87	2,59	71,19	79,98	396,2	0,834
360,45	530	2654,41	2,43	62,48	65,05	293,26	0,841
249,85	370	1831,27	2,43	62,57	45,1	175,33	0,845
143,7	220	1064,27	2,42	62,05	25,91	85,84	0,837
100,49	160	758,06	2,41	61,41	18,09	55,82	0,821

Показано, що ВІД забезпечує регулювання частотою обертання ротора у діапазоні 1:4,4 зміною напруги живлення в межах (640...160) В при постійних кутах

$\theta_{\text{вм}}^{\circ} = 45$ і $\theta_{\text{вим}}^{\circ} = 75$. На цьому діапазоні максимальне значення ККД дорівнює 84,5%, мінімальне – 82,1%. Для насосного обладнання достатній діапазон регулювання 1:2 (від 300 рад/с до 150 рад/с), для якого ККД практично не змінюється (84,4 %...84%).

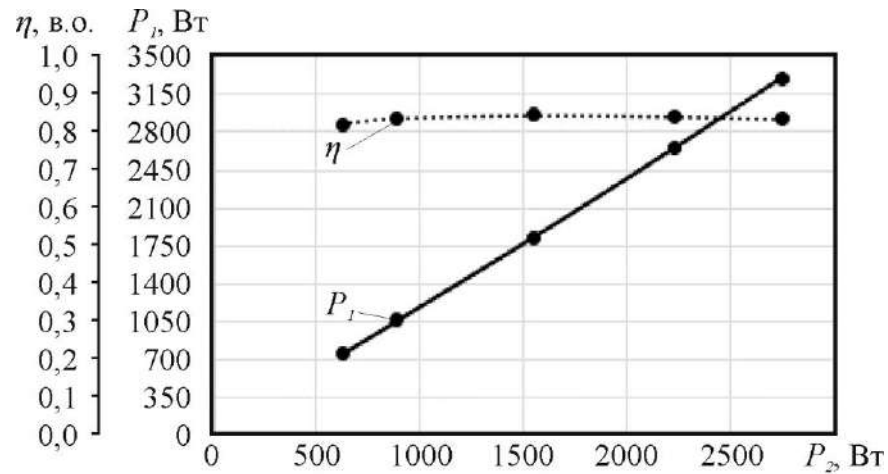


Рис. 5.15 Залежності $P_1 = f(P_2)$ та $\eta = f(P_2)$ ВІД, $U_d = \text{var}$, $M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\theta_{\text{вм}}^{\circ} = 45$

Таблиця 5.10

Результати розрахунків режимів роботи насосного агрегату при зміні напруги (

$$\theta_{\text{вм}}^{\circ} = 37,5, M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м})$$

ω_r , рад/с	U_d , В	P_1 , Вт	I_ϕ , А	P_a , Вт	$P_{\text{мех}}$, Вт	$P_{\text{ст}}$, Вт	η , в.о.
507,59	640	3662,71	2,78	81,94	85,94	349,38	0,859
419,78	530	3018,04	2,80	83,04	71,16	262,56	0,862
289,15	370	2080,14	2,83	84,63	49,06	154,64	0,861
163,62	220	1202,02	2,86	86,48	27,70	73,93	0,844
112,43	160	850,73	2,88	87,78	18,96	47,25	0,819

При $\theta_{\text{вм}} = 37,5 \text{ град}$ ВІД забезпечує регулювання частоти обертання у діапазоні 1:4,5 зміною напруги живлення в межах (640...160) В. На цьому діапазоні максимальне значення ККД дорівнює 86,2%, що на 1,5% більше, ніж при $\theta_{\text{вм}} = 45$

град. Для діапазону регулювання 1:2 (від 300 рад/с до 150 рад/с) ККД змінюється лише на 2% (від 86,1 % до 84,2%).

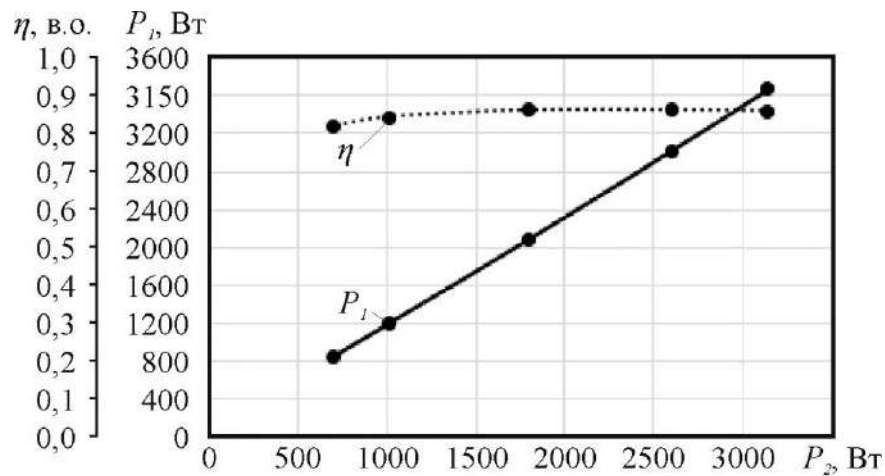


Рис. 5.16 Залежності $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ ВІД, $U_d = var$, $M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\theta_{\text{вм}}^\circ = 37,5$

5.2.2 Регулювання частоти обертання ВІД за зміни кутів комутації і постійній напрузі живлення

На третьому етапі проведено дослідження електромагнітних процесів насосного агрегату на основі ВІД при варіюванні кутом вмикання в діапазоні (36...51) град при постійній зоні комутації для напруг $U_d = 530 \text{ В}$ та 160 В (табл. 5.11 і табл. 5.12). Отримано залежності: $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ (рис. 5.17, рис. 5.18). Залежності $P_c = f(P_2)$, $P_{\text{мех}} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ на рис. К.4 і рис. К.5 (Додаток К).

Таблиця 5.11

Результати розрахунків квазісталих режимів ВІД за зміни кута вмикання,

$$U_d = 530 \text{ В}, M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}, \theta_k = 30^\circ$$

ω_r , рад/с	$\theta_{\text{вм}}$, град	P_1 , Вт	I_ϕ , А	P_a , Вт	$P_{\text{мех}}$, Вт	P_c , Вт	η , %
424,32	36	3051,41	2,94	91,51	71,01	259,42	86,2
412,36	39	2969,06	2,68	76,19	70,82	266,74	86,1
390,07	42	2830,31	2,51	66,48	68,75	277,86	85,4
360,45	45	2654,41	2,43	62,48	65,05	293,26	84,1
324,77	48	2454,13	2,54	68,07	59,67	313,85	82,0
282,60	51	2243,68	3,05	98,41	52,35	341,70	78,1

Таблиця 5.12

Результати розрахунків квазісталих режимів ВІД за зміни кута вмикання,

$$U_d = 160 \text{ В}, M_c = 6,2 \text{ Н}\cdot\text{м}, \theta_k = 30^\circ$$

ω_r , рад/с	$\theta_{\text{вм}}$, град	P_1 , Вт	I_ϕ , А	P_a , Вт	$P_{\text{мех}}$, Вт	$P_{\text{ст}}$, Вт	η , %
112,31	36	858,92	3,04	97,96	18,66	46,35	81,0
111,48	39	838,02	2,74	79,66	19,07	48,45	82,4
107,25	42	802,89	2,53	67,80	18,85	51,62	82,8
100,49	45	758,06	2,41	61,41	18,09	55,82	82,1
91,81	48	708,79	2,42	61,97	16,84	61,06	80,3
81,06	51	661,82	2,70	77,25	15,02	67,23	75,9

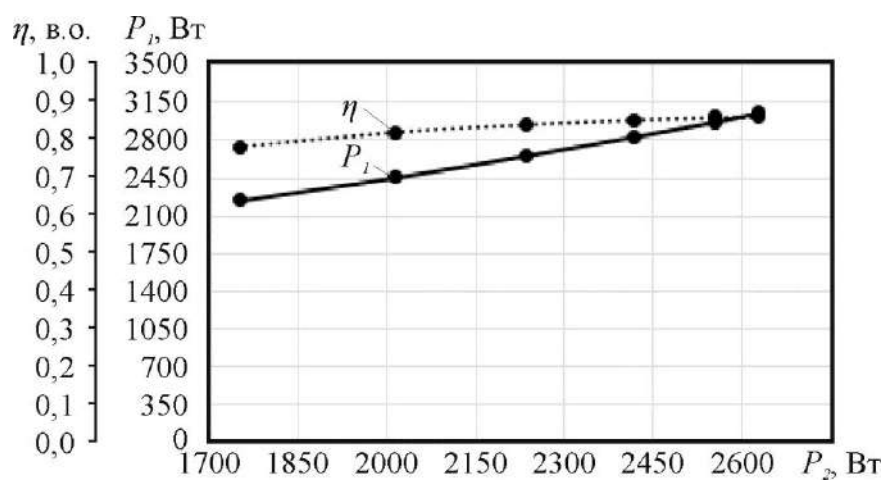


Рис. 5.17 Залежності $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ ВІД, $\theta_{\text{вм}} = \text{var}$,

$$U_d = 530 \text{ В}, M_c = 6,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

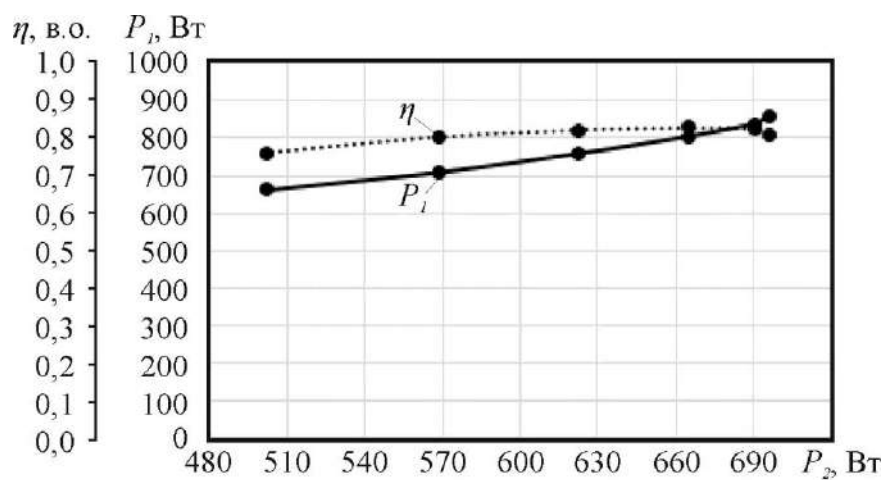


Рис. 5.18 Залежності $P_1 = f(P_2)$, $\eta = f(P_2)$ ВІД, $\theta_{\text{вм}} = \text{var}$,

$$U_d = 160 \text{ В}, M_c = 6,2 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Результати досліджень показали, що при постійній напрузі ($U_d = 530 \text{ В}$) та варіюванні кутами вмикання в діапазоні (36...51) град можна розширити зону регулювання частотою обертання двигуна на 18%...22% відносно базового кута 45 град та обрати раціональні кути вмикання ($\theta_{\text{вм}}^{\circ} = 36$, $\theta_{\text{вм}}^{\circ} = 39$), які дозволяють збільшити ККД на 2% в порівнянні з базовим кутом. Для напруги $U_d = 160 \text{ В}$ за зміни кутів комутації у діапазоні (36...51) град визначено раціональний кут $\theta_{\text{вм}}^{\circ} = 42$, що дозволяє збільшити ККД до 82,8%.

Таким чином, керування частоти обертання ротора ВІД за допомогою зміни напруги у широкому діапазоні є економічним для насосного обладнання тощо, оскільки значення ККД змінюється не суттєво (на 0,5%) у діапазоні зміни частоти 1:2 і на 2% – для діапазону 1:4,5. Для ефективного керування ВІД із змінним навантаженням запропоновано спосіб, стосовно якого доцільно провести аналіз впливу кутів комутації та обрати кут вмикання фазної напруги при постійній зоні комутації за критерієм максимуму ККД. Залишаючи його незмінним здійснювати регулювання зміною напруги, якщо є така можливість. При її відсутності регулювання необхідно здійснювати зміною кута вмикання, обираючи його за забезпеченням максимального значення ККД для конкретного режиму ВІД з урахуванням навантаження.

5.3 Дослідження ВІД з комутатором зі С-скиданням і коливальним поверненням енергії

Технічна реалізація та експериментальні дослідження характеристик вентильно-індукторного двигуна представлена в роботі двома етапами.

На першому етапі вирішено наступні задачі: створено експериментальний зразок ВІД; розроблено експериментальний стенд для дослідження основних його властивостей, електромеханічних та енергетичних характеристик при різних напругах живлення ланки постійного струму; експериментальним шляхом

визначено основні втрати двигуна та проведено оцінку його втрат і коефіцієнта корисної дії, що представлено у роботі [118] та Додатку Л.

Другий етап охоплює задачі, які пов'язані з порівнянням результатів чисельних розрахунків режимів ВІД з експериментальними даними та визначенням можливості ефективного регулювання і стабілізації частоти обертання ВІД з комутатором зі С-скиданням і коливальним поверненням енергії зміною напруги ланки постійного струму та кутів комутації двигуна [119]. Розглянемо ці задачі.

Чисельні дослідження робочих режимів ВІД проведено за допомогою імітаційної моделі, що представлено на рис. 3.9 – рис. 3.11. Геометричні розміри ВІД, що розроблена на основі асинхронного двигуна 4АА56У3, приведено в табл. 3.1. В якості вхідних параметрів моделі використано кути вмикання і вимкнення, напругу ланки постійного струму, залежності індуктивності фази від кута повороту ротора і фазного струму $L_\phi(\theta, i_\phi)$, що розраховано МСЕ (рис. 5.19).

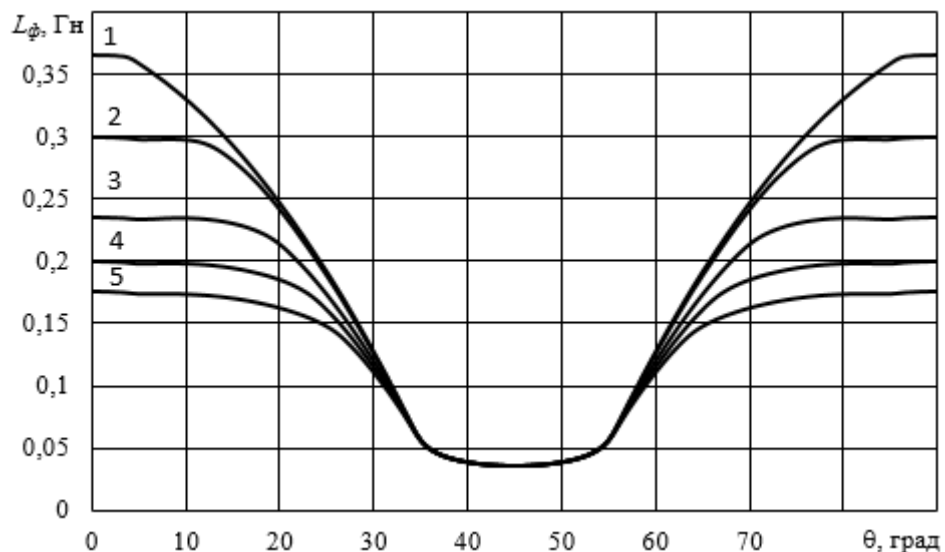


Рис. 5.19 Залежності індуктивності $L_\phi(\theta, i_\phi)$: 1 – $i_\phi = 0,7$ А; 2 – $i_\phi = 1,4$ А;
3 – $i_\phi = 2,1$ А; 4 – $i_\phi = 2,8$; 5 – $i_\phi = 3,5$ А.

Експериментальні дослідження робочих режимів при варіюванні напругою живлення та кутами комутації фаз проведено за допомогою розробленого експериментального стенду. Його електрична схема (рис. 5.20), на відміну від попередньої схеми, що представлена в роботі [118], удосконалена і дозволяє змінювати кути комутації фаз та стабілізувати частоту обертання вала двигуна. Для

дослідження впливу на характеристики ВІД зміни кутів комутації фаз та для забезпечення стабілізації обертів вала двигуна трифазний датчик положення ротора PS розташований на валу ВІД таким чином, щоб він формував максимально можливе випередження обох фронтів сигналу комутації. У схему введено формувач затримки фронтів FR сигналу датчика PS, який складається з трьох однакових сегментів, що забезпечують необхідне зміщення сигналу у кожній фазі [122].

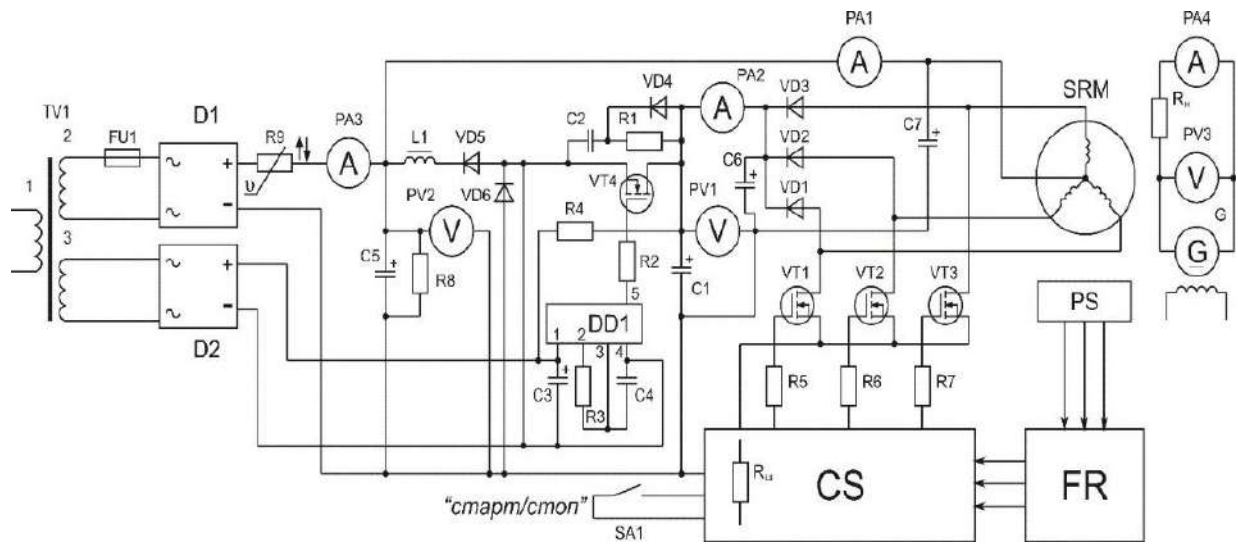


Рис. 5.20 Електрична схема експериментального стенда для дослідження режимів ВІД при варіюванні напругою живлення та кутами комутації

5.3.1 Підтвердження адекватності математичної моделі ВІД

Для підтвердження адекватності математичного моделювання реальним фізичним процесам розраховано та експериментально досліджено залежності миттєвих значень фазних струмів від кутів повороту ротора при напругах ланки постійного струму 80 В, 110 В і 140 В і кутах вмикання $\theta_{\text{вм}} = 39^\circ, 42^\circ, 45^\circ, 48^\circ, 51^\circ$ та постійній зоні комутації $\theta_{\text{к}} = \text{const}$ (30° геометричних градусів) [119]. Розрахункові (суцільні лінії) та експериментальні (пунктирні лінії) залежності струмів фази $i_{\phi} = f(\theta)$ при $\theta_{\text{вм}} = \text{var}$ для $U_d = 100$ В наведено на рис. 5.21.

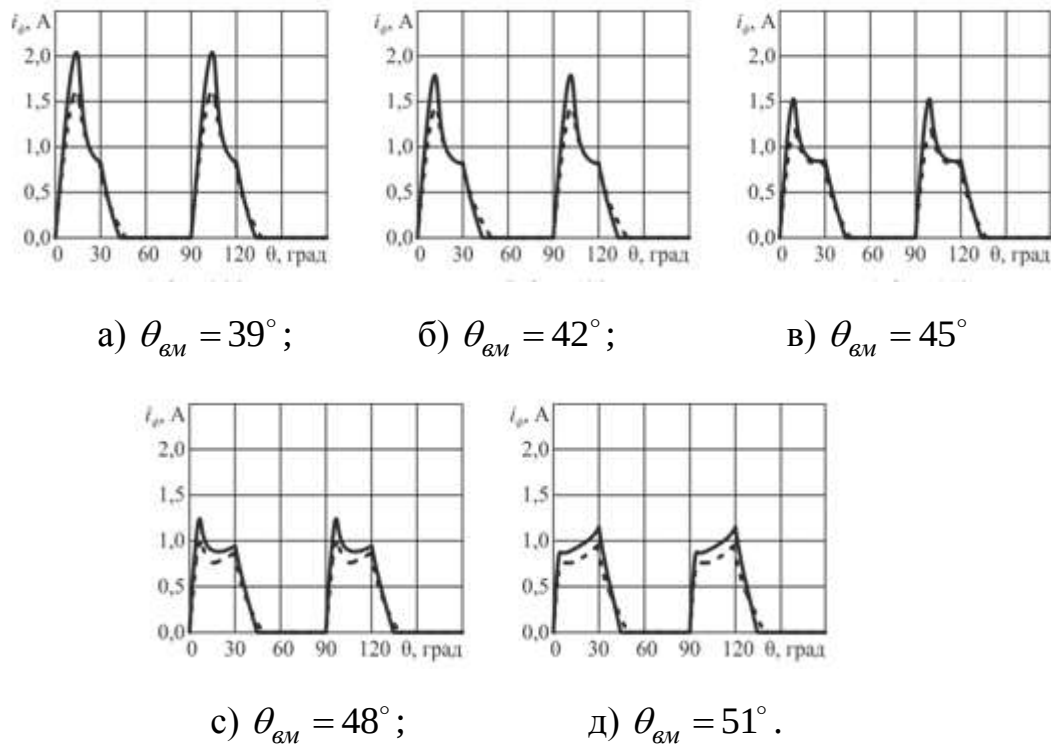


Рис. 5.21 Розрахункові та експериментальні залежності струмів фази $i_\phi = f(\theta)$,

$$\theta_{\text{вм}} = \text{var}, \theta_{\text{к}} = 30^\circ, U_d = 100 \text{ В}$$

Наведені розрахункові і експериментальні залежності $i_\phi = f(\theta)$ для однакових $\theta_{\text{вм}}$ співпадають за формою. Відносні похибки за середніми значеннями наступні: не більш 6 % – для $\theta_{\text{вм}} = 39^\circ$; 7 % – для $\theta_{\text{вм}} = 42^\circ$; 8 % – для $\theta_{\text{вм}} = 45^\circ$; 14 % – для $\theta_{\text{вм}} = 48^\circ$. Це дає підставу використовувати розроблену математичну модель для дослідження робочих режимів ВІД та оцінювання їх енергетичних показників.

Для квазісталіх режимів ВІД розраховано втрати в обмотках P_a та сталі $P_{\text{ст}}$, втрати механічні $P_{\text{мех}}$ і в комутаторі $P_{\text{к}}$, ККД ВІД (η) і ККД з врахуванням перетворювача $\eta_{\text{заг}}$. Загальний коефіцієнт корисної дії ВІД визначено за формулою (3.15). Потужність, яка споживається двигуном P_1 , розрахована як сума корисної потужності та сумарних втрат або, для перетворювача із С-скиданням і коливальним поверненням енергії, як різниця між потужностями P_d та втратами в системі повернення енергії $P_{\text{зв}}$ за формулою (3.42).

Механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за тертям у підшипниках за формулою (2.30) [10, 27, 166]. Втрати в сталі визначено за експериментом [119], втрати у вентиляційному вузлі зовнішнього обдуву та аеродинамічні втрати всередині машини не враховано.

Результати експериментальних і чисельних досліджень при вихідних потужностях ВІД, що не перевищують 50 % номінального значення, напрузі живлення близькій до 110В, кутах $\theta_{\text{вм}} = 39^\circ$ і $\theta_{\text{к}} = 30^\circ$ – у табл. 5.9 і табл. 5.10.

Таблиця 5.9

Результати експериментальних досліджень

U_d В	U_c В	I_d А	$I_{3\phi}$ А	I_ϕ А	$P_{3\phi}$ Вт	$P_{\text{мех}}$ Вт	P_c Вт	n об/хв	M_c Н·м	η %	$\eta_{\text{заг}}$ %
108	235	1,01	0,21	0,48	5,32	10,03	35,29	2055	0,23	47,8	45,4
108	235	1,04	0,22	0,49	5,7	9,92	33,87	2027	0,25	50	47,4
108	235,4	1,08	0,23	0,51	5,61	9,42	35,39	1899	0,282	50,6	48,1
107,5	235,4	1,1	0,23	0,52	5,79	9	33,98	1786	0,315	52,4	49,0
107	235	1,23	0,24	0,56	5,88	8,65	43,01	1685	0,349	48,9	46,8
107	234,6	1,27	0,24	0,58	6,04	8,35	44,34	1596	0,382	49,2	47
106,5	234	1,32	0,24	0,6	5,71	8,09	46,52	1515	0,417	49	47
106	234	1,39	0,25	0,62	6,46	7,91	48,43	1456	0,451	49	46,8

Таблиця 5.10

Результати чисельних досліджень

U_d В	U_c В	I_d А	$I_{3\phi}$ А	I_ϕ А	$P_{3\phi}$ Вт	$P_{\text{мех}}$ Вт	P_c Вт	n об/хв	M_c Н·м	η %	$\eta_{\text{заг}}$ %
108,12	231,2	0,97	0,16	0,45	4,1	8,76	35,29	2043	0,23	48,6	46,7
107,63	230,35	1	0,17	0,47	4,46	8,86	33,87	2001	0,25	50,4	48,4
107,6	230,4	1,06	0,18	0,50	4,3	8,88	35,39	1891	0,282	50,9	49
107,34	230,28	1,11	0,19	0,52	4,58	9,02	33,98	1835	0,315	53	51
106,86	227,9	1,18	0,18	0,54	3,86	8,52	43,01	1624	0,349	48,5	47
106,52	227,04	1,23	0,19	0,57	3,86	8,49	44,34	1550	0,382	48,7	47
106,22	225,82	1,29	0,2	0,59	3,6	8,43	46,52	1476	0,417	48,4	47
105,9	224,96	1,34	0,2	0,61	3,68	8,36	48,43	1407	0,451	48,2	46,9

Експериментальна (пунктирна лінія) та розрахункова (суцільна лінія) залежності ККД двигуна від моменту навантаження $\eta = f(M_2)$ побудовано з використанням даних (табл. 5.9 і табл. 5.10) і представлено на рис. 5.22.

Експериментальні та розрахункові залежності $\eta = f(M_2)$ практично співпадають (різниця між даними складає 1...2 %). За результатами аналізу цих залежностей для інших кутів визначено похибки, які не перевищують наступних значень: 3 % – для $\theta_{\text{ем}} = 42^\circ$; 4 % – для $\theta_{\text{ем}} = 45^\circ$; 8 % – для $\theta_{\text{ем}} = 48^\circ$. Отримано експериментальні та розрахункові залежності $n = f(M_2)$ (рис. 5.23 і рис. 5.24)/

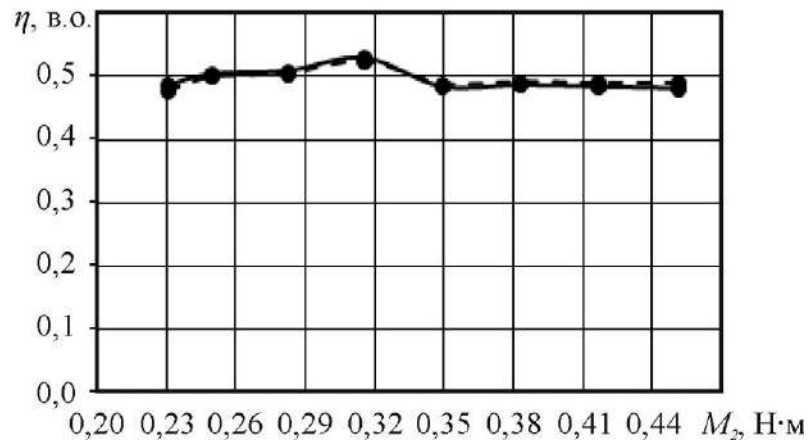


Рис. 5.22 Експериментальна та розрахункова залежності $\eta = f(M_2)$, $U_d = 110$

$$\theta_{\text{ем}} = 39^\circ U_d = 110 \text{ В}$$

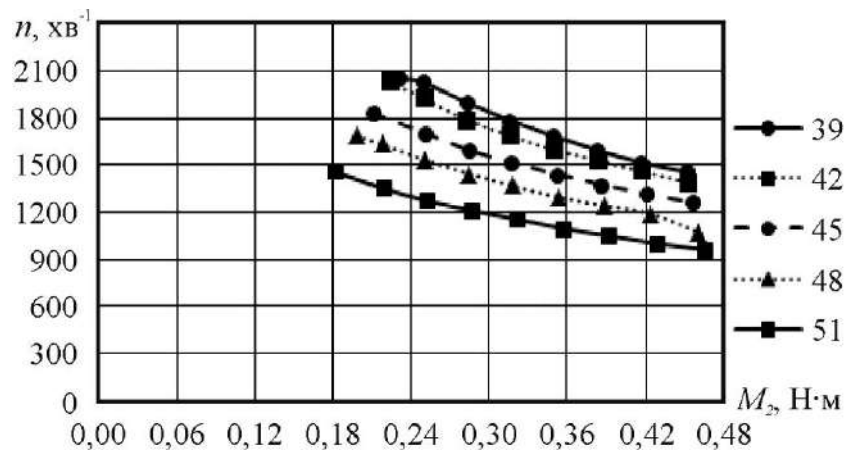


Рис. 5.23 Експериментальні залежності $n = f(M_2)$, $\theta_{\text{ем}} = \text{var}$, $U_d = 110 \text{ В}$

5.3.2 Стабілізація частоти обертання вентильно-індукторного двигуна за зміни напруги та кутів комутації

Проведемо аналіз отриманих залежностей частоти обертання ротора від моменту навантаження $\omega_r = f(M_2)$ дослідного зразка та зробимо оцінку можливості стабілізації частоти обертання ВІД у робочих режимах за зміни напруги ланки

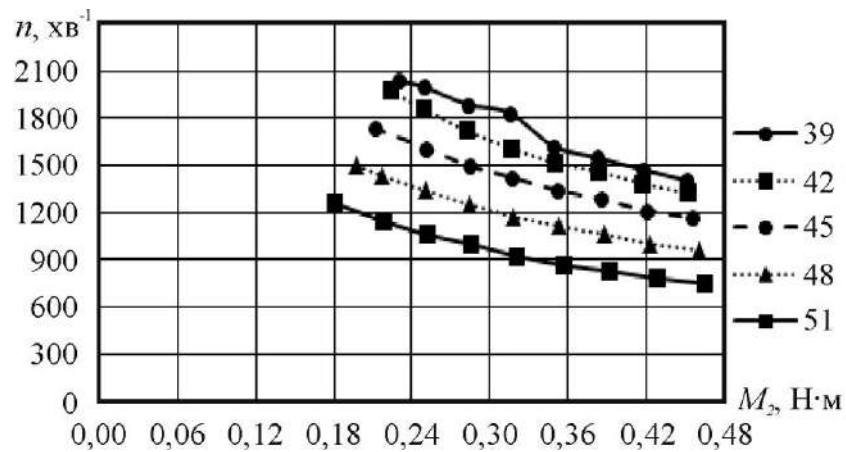


Рис. 5.24 Розрахункові залежності $n = f(M_2)$, $\theta_{om} = \text{var}$, $U_d = 110 \text{ В}$

постійного струму та кутів вмикання при постійній зоні комутації [124].

Експериментальні та розрахункові характеристики $n = f(M_2)$ для напруги живлення $U_d = 110 \text{ В}$ (рис. 5.23 та рис.5.24) дозволяють визначити діапазони стабілізації частоти обертання ВІД. Встановлено, що зміною кутів вмикання у діапазоні $\theta_{om} = 39^\circ \dots 51^\circ$ і $\theta_k = \text{const}$ можна підтримувати частоту обертання двигуна при напрузі живлення: $U_d = 80 \text{ В}$ – на рівні 1000 об/хв. (при $M_c: 0,156 \dots 0,394 \text{ Н}\cdot\text{м}$); $U_d = 110 \text{ В}$ – на рівні 1500 об/хв. (при $M_c: 0,181 \dots 0,451 \text{ Н}\cdot\text{м}$); $U_d = 140 \text{ В}$ – на рівні 2000 об/хв. (при $M_c: 0,23 \dots 0,443 \text{ Н}\cdot\text{м}$) у звуженому діапазоні $\theta_{om} = 42^\circ \dots 48^\circ$.

Таким чином, для розробці алгоритму стабілізації частоти обертання ВІД необхідно уточнювати як напругу живлення, так і кути комутації. З метою оцінки їх впливу на частоту обертання ВІД дослідного зразка (напруги живлення та кутів вмикання при $\theta_k = 30^\circ$) отримана аналітична залежність з використанням методу планування експерименту $\omega_r = f(U_d, \theta_{om})$

$$\omega_r = 157 + 55,95 \cdot x_1 + 2,395 \cdot x_2 - 19,42 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (5.3)$$

де x_1 – напруга живлення, x_2 – кут вмикання. Інтервали варіювання змінних обрано на рівні $\pm 27\%$ для U_d і $\pm 6,6\%$ для θ_{om} , за базові значення – $U_d = 110 \text{ В}$ і $\theta_{om} = 45$ град.

Похибка між експериментальними та розрахунковими даними (з використанням ортогонального плану другого порядку) не перевищує 7 %.

Показано, що найбільший вплив на зміну частоти обертання ротора двигуна здійснює напруга живлення, а також фактор спільної дії напруги та кута вмикання. Для оцінки діапазонів стабілізації частоти обертання експериментального зразка ВІД на рис. 5.25 представлена графічна реалізація залежності $\omega_r = f(U_d, \theta_{\text{вм}})$.

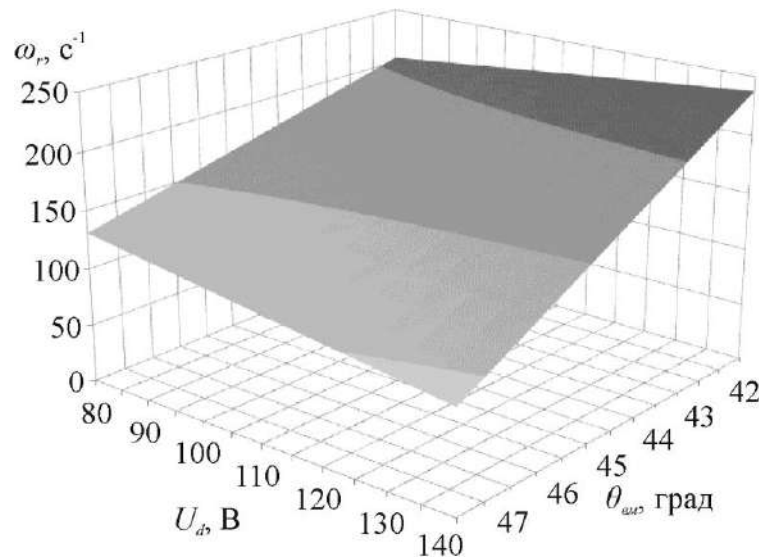


Рис. 5.25 Графічна реалізація двовимірної залежності $\omega_r = f(U_d, \theta_{\text{вм}})$

5.3.3 Дослідження впливу моменту інерції на ККД і пульсації частоти обертання ВІД одноциліндрових герметичних поршневих компресорів

Рівень пульсацій частоти обертання ротора двигунів, традиційно асинхронних, герметичних поршневих компресорів жорстко регламентований і не може перебільшувати 20 %. Для зниження амплітуди цих пульсацій на ротор двигуна встановлюють додаткову інерційну масу – маховик [7, 170]. Важливим кроком до підвищення надійності приводу ГПК є зниження пульсацій частоти обертання ротора до заданого рівня при її регулюванні зміною напруги в необхідному діапазоні частот обертання 1:4...1:6.

Проведено дослідження квазісталих режимів ВІД за допомогою ММ (див. п. 5.3, $\omega_{rn} = 314$ рад/с, $M_n = 0,33$ Н·м) з комутатором із С-скиданням і коливальним поверненням енергії, з врахуванням періодичного навантаження одноциліндрового

ГПК при регулюванні частоти обертання за зміни напруги живлення і кутів комутації з метою визначення зміни ККД і пульсацій частоти обертання ротора в робочих режимах. Часова залежність моменту навантаження одноциліндрового ГПК одинарної дії представлена на рис. 5.26. В якості вихідних параметрів моделі використано кути вмикання $\theta_{\text{вм}}$ і вимикання $\theta_{\text{вим}}$, напругу ланки постійного струму U_d , залежності індуктивності фази від кута повороту ротора і фазного струму (рис. 5.22), момент інерції $J_1 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

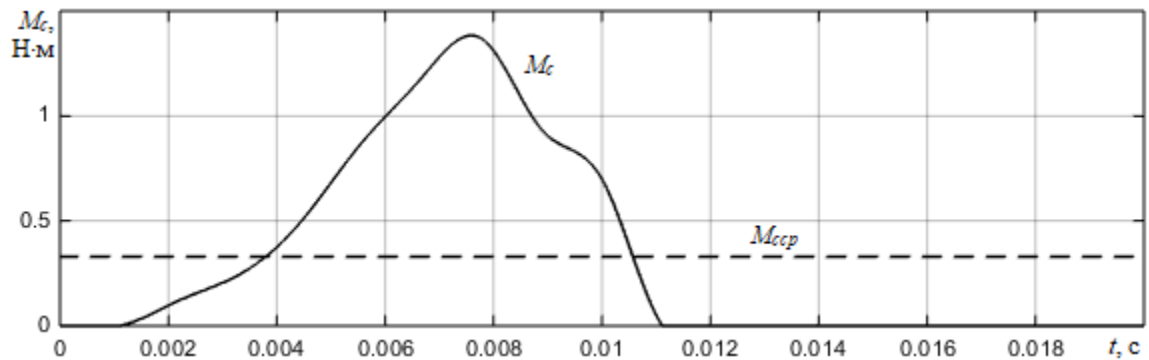


Рис. 5.26 Часова залежність моменту навантаження $M_c(\theta)$, $n_u = 1$

Розрахунок магнітних втрат, що складаються з втрат на гістерезис та на вихрові струми, виконано на основі підходу [101]. Механічні втрати визначено з урахуванням зміни частоти обертання ротора і моменту від тертя в підшипниках [119]. Використано спосіб керування ВІД, що базується на зміні кута вмикання ($\theta_{\text{вм}} = \text{var}$) у межах $\theta_{\text{вм}} = 39^\circ \dots 51^\circ$ за сталого кута ($\theta_k = 30^\circ$) і симетричній одиничній комутації.

Досліджено вплив моменту інерції приводу герметичного поршневого компресора на ККД і пульсації частоти обертання ротора ВІД у квазісталих режимах за зміни напруги у діапазоні $U_d = 66 \dots 216$ В при базових кутах $\theta_{\text{вм}} = 45$ град і $\theta_{\text{вим}} = 75$ град. Пульсації $\delta\omega_r$ для частот обертання ротора двигуна 750, 1000, 1500, 3000 об/хв. розраховано за формулою (1.1). З'ясовано, що при збільшенні моменту інерції від $J_2 = 2,5 \cdot J_1 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (рис 5.27) до $J_3 = 4 \cdot J_1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ $\delta\omega_r$ зменшуються від 80% до 20 % для 750 об/хв та від 12 % до 0,7% – для 3000 об/хв (рис.5.28).

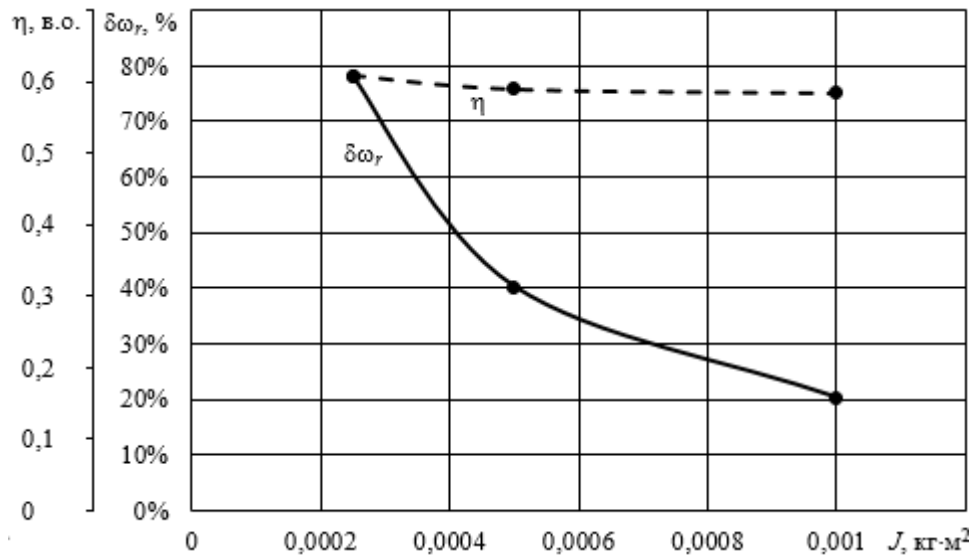


Рис. 5.27 Залежності $\delta\omega_r = f(J)$, $\eta = f(J)$ для частоти обертання 750 об/хв.

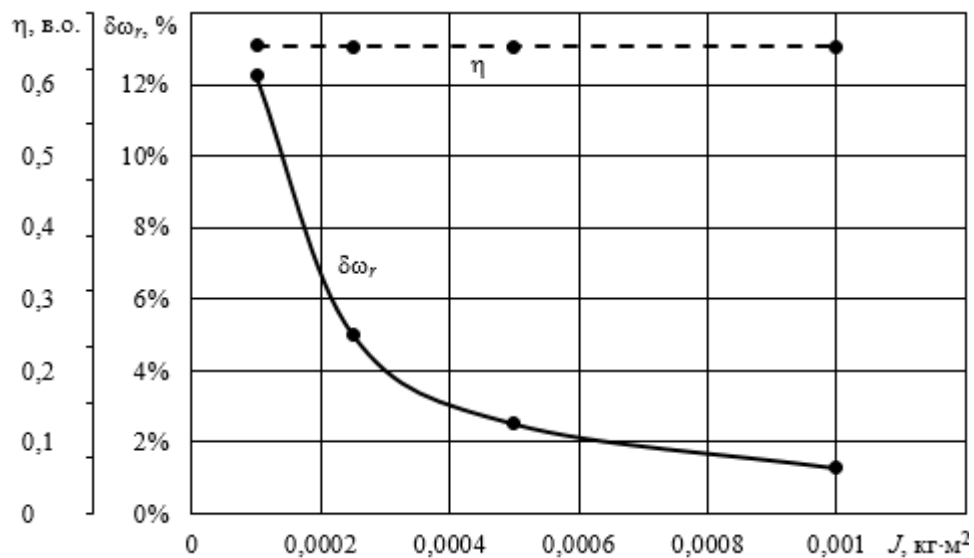


Рис. 5.28 Залежності $\delta\omega_r = f(J)$, $\eta = f(J)$ для частоти обертання 3000 об/хв.

Досліджено залежності ККД і пульсацій частоти обертання ротора від корисної потужності вентильно-індукторного двигуна для різних моментів інерції з періодичним моментом опору і постійним моментом, який дорівнює його середньому значенню за період навантаження $M_{cp} = 0,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (рис. 5.29 – рис.5.31). Для порівняння результатів розрахунків представлено залежності $\eta = f(P_2)$, $\delta\omega_r = f(P_2)$ для базового момента інерції $J_1 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ на рис. 5.30 і рис. 5.31 відповідно. Показано, що розбіжність результатів при розрахунках пульсацій частоти обертання ротора ВІД з $M_c = f(\theta)$ і $M_c = \text{const}$ збільшується від 10 % до 90 % у діапазоні регулювання двигуна 1:3. Це підкреслює необхідність

врахування періодичного характеру навантаження для адекватного математичного моделювання робочих режимів ВІД у складі ГПК.

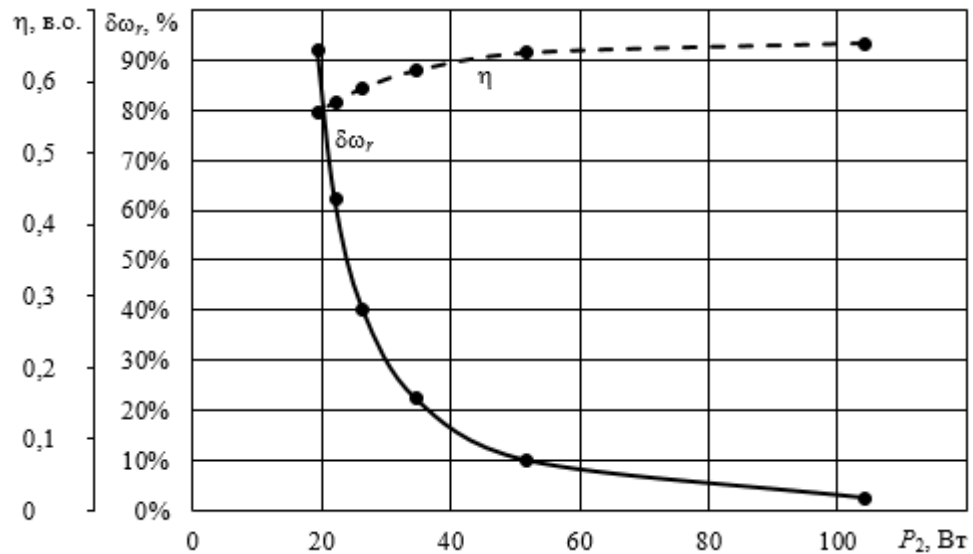


Рис. 5.29 Залежності $\eta = f(P_2)$, $\delta\omega_r = f(P_2)$ ВІД для $M_c = f(\theta)$, $J = 5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

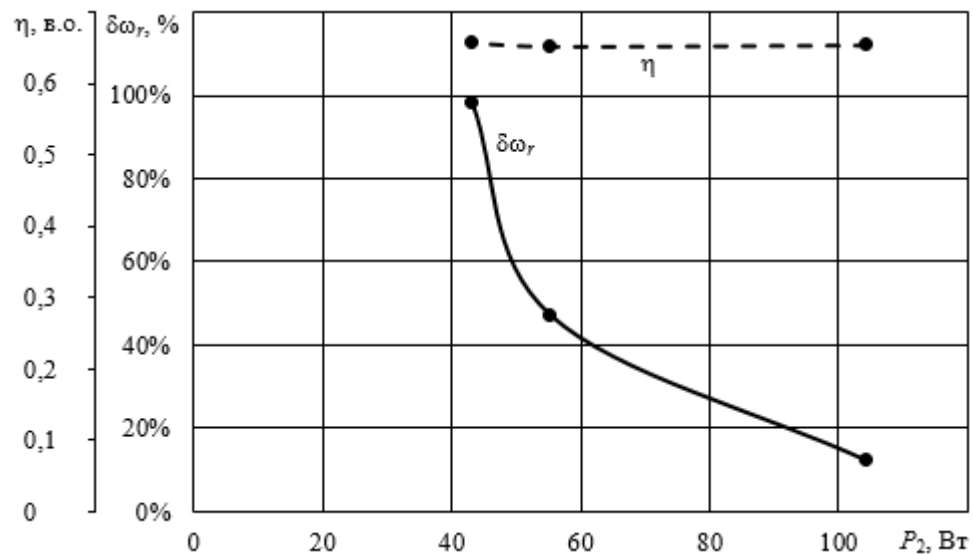


Рис. 5.30 Залежності $\eta = f(P_2)$ і $\delta\omega_r = f(P_2)$ ВІД для $M_c = f(\theta)$, $J = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

За результатами досліджень визначено, що необхідний рівень пульсацій частоти обертання ротора ($\delta\omega_r = 20\%$) ВІД базової конфігурації 6/4 герметичного поршневого одноциліндрового компресора при її регулюванні базовими кутами вмикання і вимикання у діапазоні 1:4 можна забезпечити завдяки моменту інерції приводу $J = 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

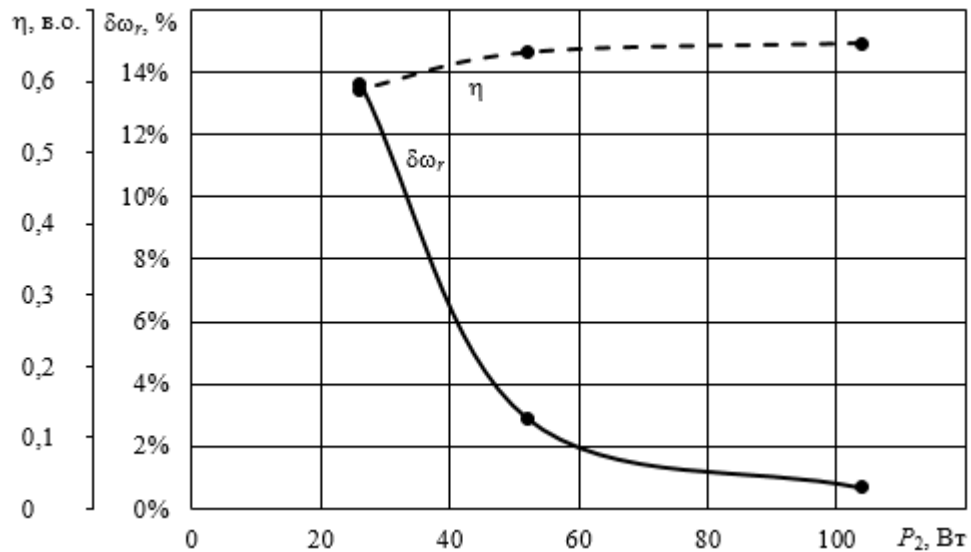
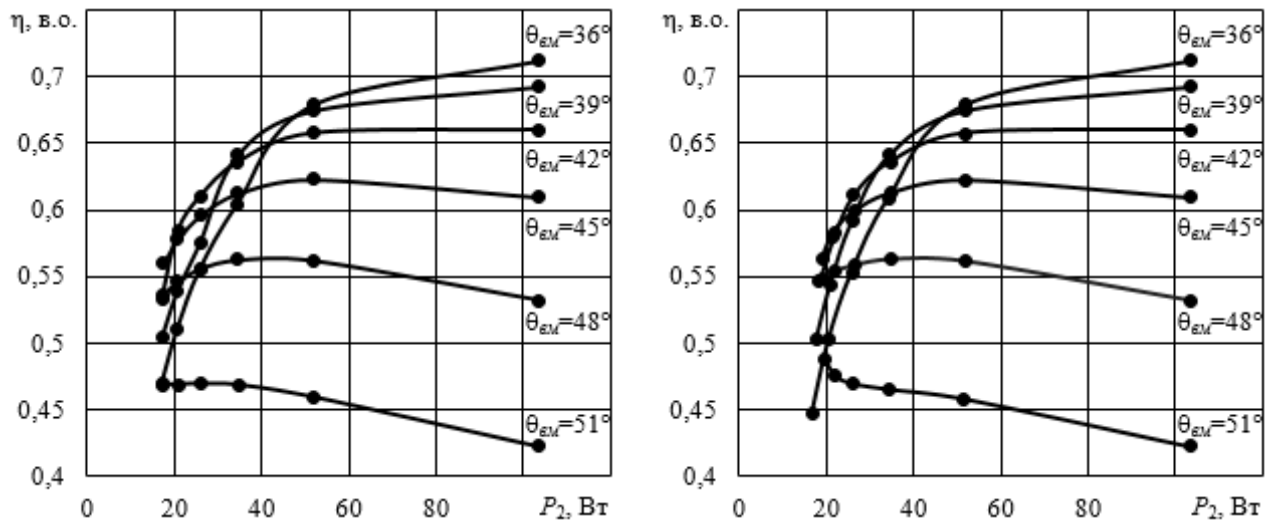


Рис. 5.31 Залежності пульсацій частоти обертання ротора ВІД та його ККД від корисної потужності для $M_c = const$, $J = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

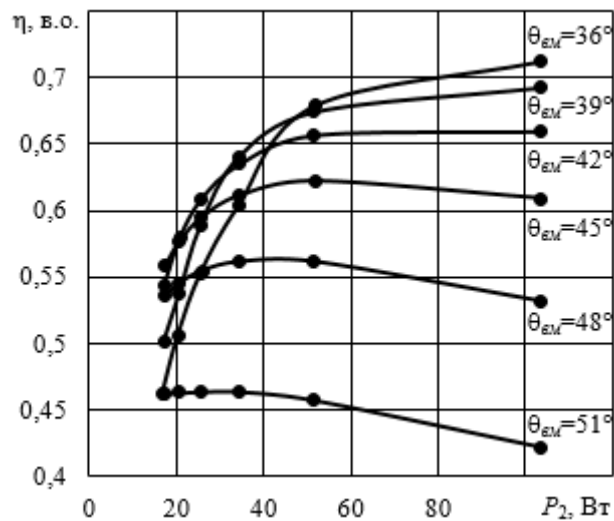
5.3.4 Формування ефективних характеристик робочих режимів вентильно-індукторних двигунів герметичних поршневих компресорів

З використанням математичної моделі досліджено робочі режими вентильно-індукторного двигуна (п. 5.3.3) одноциліндрового поршневого компресора за зміни напруги живлення, кутів комутації та моменту інерції з врахуванням періодичного навантаження, що дозволило сформувати характеристики двигуна, які забезпечують підвищення його енергоефективності [32].

Отримані залежності ККД від корисної потужності P_2 за зміни напруги живлення для кутів комутації (зміні кута вмикання ($\theta_{\text{вм}} = \text{var}$) у межах $\theta_{\text{вм}} = 36^\circ \dots 51^\circ$ за сталого кута ($\theta_{\text{к}} = 30^\circ$) і симетричній комутації при сталому (коли $M_{\text{ср}} = 0,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$) і періодичному навантаженні, наведено на рис. 5.32.



а) $M_c = const$, $J_1 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; б) $M_c(\theta)$, $J_2 = 5 \cdot J_1$ (б)



в) $M_c(\theta)$, $J_1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$

Рис. 5.32 Залежності $\eta = f(P_2)$ для $\theta = var$

Кожна залежність розрахована при сталих кутах вмикання і вимикання і зміні напруги. Потужності 103 Вт відповідає частота обертання 3000 об/хв, 52 Вт – 1500 об/хв. Отримані залежності ККД з періодичним навантаженням з моментом інерції $J_2 = 5 \cdot J_1 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ практично не відрізняються від ККД двигуна зі сталим навантаженням при $J_1 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. (сталий момент дорівнює середньому значенню періодичного навантаження).

За результатами досліджень низки залежностей ККД від корисної потужності ВІД одноциліндрових поршневих компресорів за зміни напруги живлення і сталих кутах вмикання і вимикання при періодичному і постійному (коли $M_c = 0,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$)

навантаженні визначено, за умови їх ідентичності, мінімальний момент інерції приводу $5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Зсув зони комутації в сторону зниження кутів вмикання та вимикання призводить до підвищення ККД двигуна, однак зростання ефективності спостерігається не на всьому діапазоні навантажень. Це дозволяє сформулювати алгоритм зміни кутів комутації, який забезпечує максимальні значення ККД вентильно-індукторних двигунів одноциліндрових компресорів одинарної дії на всьому інтервалі регулювання частоти обертання ротора:

- в діапазоні 3000...1500 об/хв ВІД повинні працювати з кутами комутації $\theta_{\text{вм}} = 36^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 66^\circ$ і напругою $U_d = 133...77 \text{ В}$;
- від 1500 до 1000 об/хв – за кутів $\theta_{\text{вм}} = 39^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 69^\circ$, $U_d = 185...137 \text{ В}$;
- від 1000 до 500 об/хв – за $\theta_{\text{вм}} = 42^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 72^\circ$, $U_d = 149...88 \text{ В}$.

Досліджено вплив моменту інерції приводу ГПК на пульсації частоти обертання ротора ВІД для діапазону регулювання частоти обертання 1:6 за постійних кутів комутації (рис. 5.33).

Показано, що регламентований рівень пульсацій ($\delta n = 20\%$) при регулюванні частоти у діапазоні 1:3 (3000...1000 об/хв) можна забезпечити за моменту інерції приводу $5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, у діапазоні 1:4 (3000...750 об/хв) – $1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Збільшення моменту інерції призводить до зменшення пульсацій і розширення діапазону регулювання. Розширення діапазону (до 1:6) за даної умови може бути реалізовано [32]:

- для пульсуючого навантаження двоциліндрового компресора, що забезпечує пульсації частоти обертання у межах 0,3...12,8 % ($M_{\text{ср}} = 0,32 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $J = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$),
- для меншого в два рази періодичного навантаження ($M_{\text{ср}} = 0,165 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $J = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) за сталих кутів комутації за рахунок зміни напруги живлення.

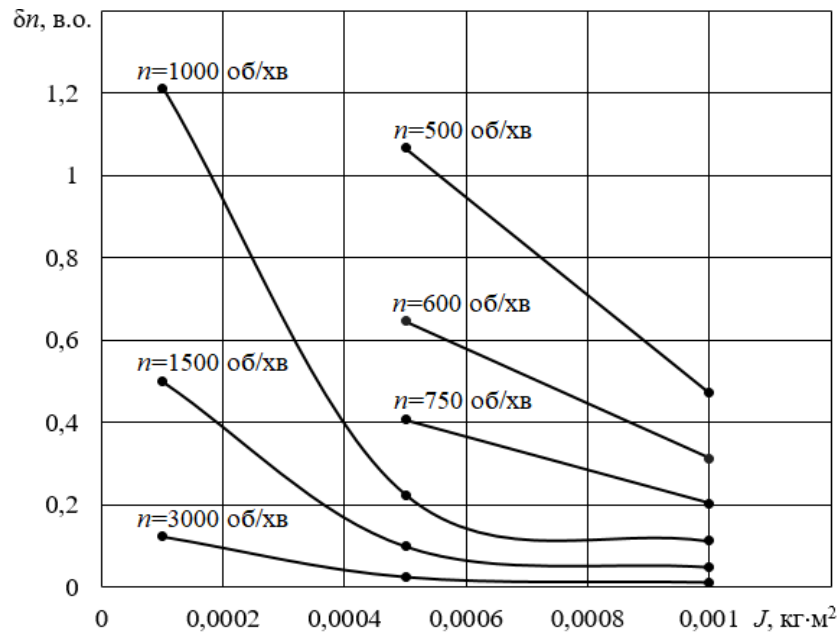


Рис. 5.33 Залежності пульсацій частоти обертання ротора ВІД від моменту інерції приводу одноциліндрового ГПК за сталих кутів $\theta_{\text{вм}} = 42^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 72^\circ$.

На рис. 5.34 зображені механічні характеристики ВІД при постійних кутах комутації ($\theta_{\text{вм}} = 42^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 72^\circ$) за зміни напруги живлення у діапазоні 31...121 В, що дає можливість регулювати частоту обертання ротора у діапазоні 1:6 з періодичним навантаженням $M_{\text{ср}} = 0,165 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Показано, що при зниженні частоти обертання двигуна від 3000 до 500 об/хв для кутів $\theta_{\text{вм}} = 36^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 66^\circ$ та $M_{\text{ср}} = 0,165 \text{ Н} \cdot \text{м}$ його ККД зменшується на 1...5 % в порівнянні з $M_{\text{ср}} = 0,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$ [32].

З'ясовано, що при номінальній частоті обертання для $M_{\text{ср}} = 0,165 \text{ Н} \cdot \text{м}$ найбільший ККД забезпечують кути комутації $\theta_{\text{вм}} = 36^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 66^\circ$, при частотах обертання у діапазоні 750...500 об/хв – кути $\theta_{\text{вм}} = 42^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 72^\circ$, які дозволяють збільшити ККД на 2..5 % в порівнянні з кутами $\theta_{\text{вм}} = 36^\circ$, $\theta_{\text{вим}} = 66^\circ$. Проведено дослідження впливу зменшення моменту навантаження у два рази на ККД двигуна за зміни кутів комутації (рис. 5.35).

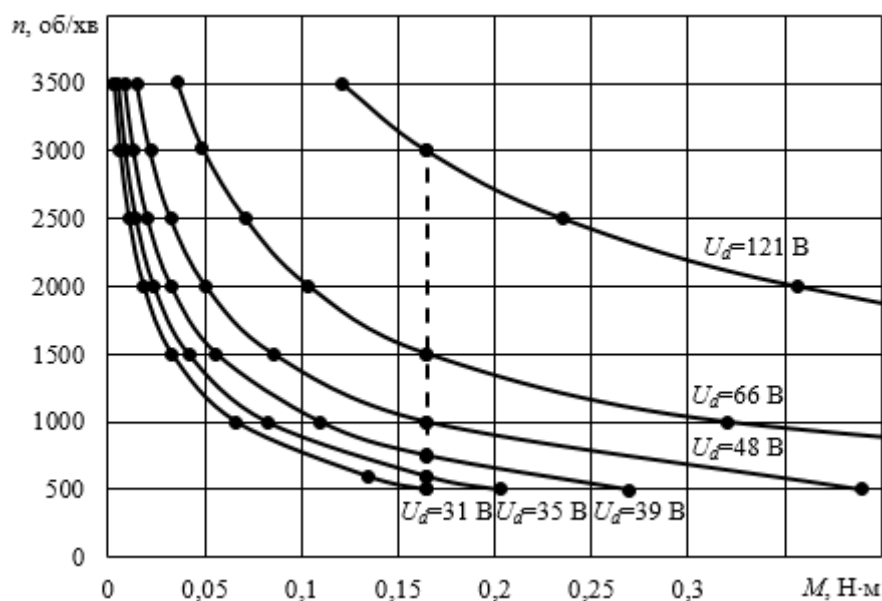


Рис. 5.34 Механічні характеристики ВІД, U_d – var ($\theta_{\text{вм}} = 42^\circ$, $\theta_{\text{вум}} = 72^\circ$).

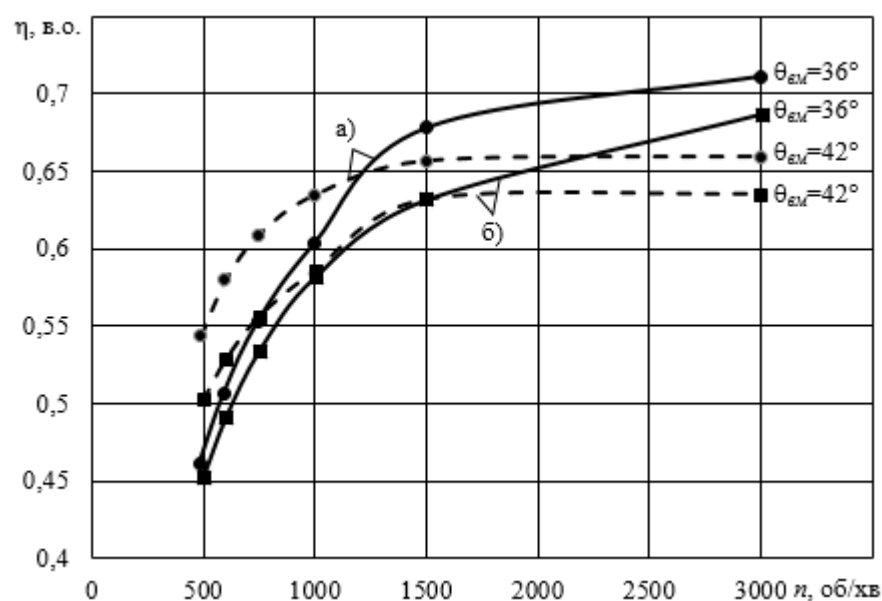


Рис. 5.35 Залежності ККД від частоти обертання ротора ВІД при регулюванні частоти обертання ротора зміною напруги живлення та сталих кутах:

а – $M_{\text{ср}} = 0,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$; б – $M_{\text{ср}} = 0,165 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Посилання [10, 20, 22, 28, 30, 32, 101, 118, 119, 122, 124, 135, 166, 169, 170, 199, 227] див. список викоистаних джерел стор. 275 – 299.

5.4 Висновки до розділу 5

1. За допомогою розроблених математичних моделей досліджено вплив характеру навантаження, зміни напруги живлення і кутів комутації, моменту інерції на пульсації електромагнітних моментів і частоти обертання ротора і ККД вентильно-індукторних двигунів насосів, поршневих одно – і двоциліндрових компресорів з метою уточнення характеру протікання електромагнітних і електромеханічних процесів. Визначено особливості квазісталіх режимів ВІД: незначна зміна ККД при врахуванні періодичного навантаження для номінальної частоти обертання ротора та зменшення ККД до 2% ...7% при її регулюванні у діапазоні 1:2 ...1:4.

2. Для підвищення енергоефективності робочих режимів ВІД із змінним навантаженням застосовано і обгрунтовано спосіб керування ВІД, який реалізується за допомогою зміни кута вмикання при постійній зоні комутації. За обраним способом розроблено алгоритми керування кутами комутації ВІД, які забезпечують максимальні значення ККД в робочих режимах, що забезпечує підвищення енергоефективності насосів, верстатів-гойдалок та поршневих компресорів. Залишаючи незмінними кути комутації, якщо є така можливість, пропонується здійснювати регулювання частоти обертання двигунів зміною напруги. Алгоритми адаптовано для формування ефективних режимів насосів, верстатів-гойдалок та поршневих компресорів.

3. Розроблено у габаритах двигуна 4AA56A4 дослідний зразок ВІД з комутатором з С-скиданням і коливальним поверненням енергії, який дозволяє підвищити ККД на 1...7% в порівнянні з серійним АД, забезпечує надійний плавний пуск при зниженні напруги та широкий діапазон регулювання частоти обертання 1:5 (3000 об/хв. : 600 об/хв.). Такий ВІД призначений для використання в комунальному секторі, побутовій техніці тощо та презентований як новітня розробка на виставці-форумі інновацій і науково-технічних розробок НАН України (21-24 листопада 2017 р. і 2018 р.);

4. Адекватність математичного моделювання ВІД з комутатором з С-

скиданням і коливальним поверненням енергії підтверджено порівнянням чисельних розрахунків з експериментальними даними. Розбіжності значень струмів фаз і ККД, які отримані за зміни кутів комутації у діапазоні $\theta_{\text{ам}} = 39^\circ \dots 48^\circ$, не перевищують відповідно 8,5% і 7%.

5. Науково обгрунтовано принципи керування частотою обертання вентильно-індукторних двигунів насосів і компресорів і верстат-гойдалок та її стабілізації шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації, що дозволяє формувати енергоефективні робочі режими ВІД для змінного навантаження. Вперше розроблено принцип регулювання частоти обертання ВІД одноциліндрових поршневих компресорів за зміни напруги живлення і кутів комутації із забезпеченням критеріїв ефективності робочих режимів – максимальних значень ККД і необхідного регламентованого рівня пульсацій частоти обертання роторів у робочому діапазоні 1:6 з врахуванням періодичного навантаження.

6. Науково обгрунтовано доцільність врахування періодичного навантаження при розрахунках відносних пульсацій частоти обертання ротора ВІД за її зміни у квазісталих режимах. Вперше встановлено, що для ВІД герметичних поршневих компресорів: розбіжність результатів розрахунку з періодичним і постійним навантаженням (середнє значення періодичного і постійного навантаження однакові) знаходиться у межах 10 ... 90 % для діапазону частоти обертання 1:6.

7. На основі чисельних досліджень визначено значення моментів інерції поршневих компресорів, що забезпечують регламентований рівень пульсацій частоти обертання ротора ВІД (20%) і номінального моменту навантаження в діапазонах: 1:4 – для одноциліндрових компресорів, 1:6 – двоциліндрових.

8. Реалізація запропонованих засобів щодо дослідження квазісталих режимів, принципів регулювання і стабілізації частоти обертання вентильно-індукторних двигунів шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації із забезпеченням високих значень ККД у робочих режимах та обгрунтування доцільності вибору моментів інерції з врахуванням навантаження сприятиме підвищенню енергоефективності і надійності ВІД та електромеханічних систем на їх основі.

РОЗДІЛ 6

ОПТИМАЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ І ВЕНТИЛЬНО - ІНДУКТОРНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ЕМС ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

6.1 Постановка задачі

Комплексне, системне або індивідуальне проектування застосовується у електромашинобудуванні і пов'язано з технологіями гнучкого виробництва, коли максимальна ефективність електромеханічних систем досягається завдяки урахуванню особливостей електромеханічного перетворювача, характеру навантаження та умов експлуатації системи і, відповідно до них, застосуванню оптимальних конструктивних і параметричних рішень.

Представлені попередні дослідження підкреслили необхідність оптимального проектування з урахуванням характеру навантаження серійних нерегульованих і регульованих АД, розробці оптимальної геометрії ВІД та формування їх ефективних характеристик із забезпеченням зниження пульсацій електромагнітних моментів і частоти обертання ротора та підвищення ККД в робочих режимах.

Розділ присвячено розвитку теорії електричних машин в напрямку оптимального проектування асинхронних і вентильно-індукторних двигунів для змінного навантаження з метою підвищення ефективності робочих режимів. Математичний опис перехідних процесів ЕМПЕ з врахуванням періодичного навантаження, а також пошук оптимального співвідношення параметрів, що забезпечують ефективні режими роботи ВІД і АД, становить одне з головних завдань аналізу й синтезу. У випадку синтезу складних нелінійних систем обґрунтовано використання методу планування експерименту. За його допомогою можна отримати залежності показників квазісталих режимів асинхронних і вентильно-індукторних двигунів від сукупності їх параметрів, знайти надалі оптимальні значення експлуатаційних показників та визначити оптимальні технічні рішення. Комплексне розв'язання даного завдання потребує поряд з розробленням комплексних математичних моделей формування системи критеріїв для оцінки

ефективності електромеханічних перетворювачів енергії та електромеханічних систем на їх основі, розроблення концепції оптимального проектування ЕМПЕ з врахуванням динаміки навантаження з метою покращення технічних показників у робочих режимах, підвищення енергоефективності, надійності та зниження масо-габаритних показників.

6.2 Обґрунтування системи критеріїв для оцінки енергоефективності та надійності електромеханічних систем зі змінним навантаженням

Однією з головних вимог щодо електродвигунів герметичних компресорів є обмеження пульсацій частоти обертання ротора і струмів. В той же час повинні забезпечуватись надійний пуск двигунів, необхідний максимальний момент (середній за один оберт вала) і високі енергетичні показники у робочих режимах. Тому, для оцінки ефективності та надійності ЕМПЕ з періодичним навантаженням ГПК необхідний комплексний критерій, який задовольнятиме вимогам надійного пуску, кратності максимального моменту та мінімальним пульсаціям частоти обертання ротора, струмів та електромагнітного моменту двигунів.

Оскільки ці вимоги є заперечливими для вентильно-індукторних двигунів, тому в якості критерію на етапі попереднього проектування геометричних розмірів статора і ротора пропонується комплексний критерій: мінімальні пульсації електромагнітного моменту із забезпеченням його необхідного середнього значення при одиничній комутації. Внутрішній діаметр статора обиратиметься саме за максимальним значенням статичного середнього електромагнітного моменту на основі чисельних розрахунків з використанням методу скінчених елементів.

Важливою вимогою для ЕМПЕ, які працюють в умовах періодичного навантаження, є високі значення коефіцієнтів корисної дії. Тому для визначення енергоефективних робочих квазісталих режимів пропонується використовувати інтегральне значення ККД, який розраховується для періоду змінного навантаження.

Вкрай необхідним є визначення критеріїв комплексної оцінки енергоефективності електромеханічних систем у цілому. З цією метою сформовано

коефіцієнт енергоефективності та обґрунтована доцільність його застосування для комплексної оцінки енергоефективності насосної установки багатоповерхового будинку. Результати представлено у розділі 7.

6.3 Розроблення концепції оптимального проектування АД з врахуванням особливостей навантаження

На основі проведених досліджень (див п. 4.4) сформулюємо основні етапи концепції оптимального проектування асинхронних двигунів у квазісталих режимах з метою покращення їх технічних показників в робочих режимах з урахуванням періодичного моменту опору:

а) вибір цільової функції (з метою підвищення енергоефективності робочих режимів ЕМПЕ обраний критерій у вигляді залежності коефіцієнта корисної дії у квазісталих режимах від параметрів оптимізації);

б) вибір параметрів оптимізації (конструктивних параметрів двигунів, фазозсуваючих елементів статора, моментів інерції тощо) $X_1, X_2, \dots, X_n$;

в) еквівалентування заданого змінного моменту опору двигуна, наприклад поршневого компресора, який є періодичною функцією кута поворота ротора, еквівалентним сталим моментом, що розраховується як його середнє значення на періоді повторення;

г) дослідження квазісталих режимів з використанням динамічної моделі варіантів ЕМПЕ згідно обраного плану методу планування експерименту та розрахунок згідно запропонованого алгоритму (див. п. 2.2) інтегральних значень їх показників, коефіцієнтів корисної дії тощо, при варіюванні конструктивних параметрів двигунів;

д) отримання в аналітичному вигляді залежності ККД двигунів у *квазісталих* режимах ($\eta_{кв}$) відносно параметрів оптимізації ($x_1, x_2, \dots, x_n$)

$$\eta_{кв} = f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (6.1)$$

е) оптимізація функції (6.1), визначення оптимального максимального значення ККД у квазісталих режимах ($\eta_{кв}^*$) з заданим періодичним навантаженням та оптимальних параметрів ($x_{1кв}^*, x_{2кв}^*, \dots, x_n^*$) ЕМП, які його забезпечують,

$$\eta_{кв}^*(x_{1кв}^*, x_{2кв}^*, \dots, x_n^*). \quad (6.2)$$

ж) визначення резерва підвищення енергоефективності АД у квазісталих режимах шляхом порівняння результатів оптимального проектування двигунів з врахуванням періодичного моменту опору з результатами їх оптимального проектування у сталому режимі, який включає наступні етапи:

– дослідження і розрахунок коефіцієнтів корисної дії у сталих режимах для обраних варіантів двигунів згідно МПЕ відповідно (г) за допомогою тієї ж динамічної математичної моделі за умови сталого моменту опору, який дорівнює його середньому значенню на періоді повторення та моменту інерції нескінченної величини;

– отримання аналітичної залежності коефіцієнта корисної дії в сталому режимі (η_c) в залежності від обраних параметрів оптимізації (б) з використанням МПЕ

$$\eta_c = f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (6.3)$$

– оптимізація функції (6.3) із забезпеченням максимального значення ККД (η_c^*) у сталому режимі з еквівалентним постійним навантаженням згідно (в) та визначення оптимальних параметрів двигунів ($x_{1c}^*, x_{2c}^*, \dots, x_n^*$)

$$\eta_c^*(x_{1c}^*, x_{2c}^*, \dots, x_n^*); \quad (6.4)$$

– розрахунок коефіцієнта корисної дії у квазісталому режимі роботи електромеханічних перетворювачів з отриманими згідно (6.4) оптимальними параметрами у сталому режимі ($x_{1c}^*, x_{2c}^*, \dots, x_{nc}^*$)

$$\eta_{кв}(x_{1c}^*, x_{2c}^*, \dots, x_n^*); \quad (6.5)$$

– порівняння результатів розрахунків коефіцієнтів корисної дії за виразами (6.1) і (6.5) та визначення резерву $\Delta\eta_p$ підвищення енергоефективності двигунів у квазісталих режимах за виразом

$$\Delta\eta_p = \eta_{кв}^*(x_{1кв}^*, x_{2кв}^*, \dots, x_n^*) - \eta_{кв}(x_{1с}^*, x_{2с}^*, \dots, x_n^*). \quad (6.6)$$

Даний підхід є базовим і може бути використаний для будь-якого електромеханічного перетворювача енергії за обраними критеріями пошуку їх оптимальних варіантів.

6.4 Оптимальне проектування асинхронних двигунів з врахуванням змінного навантаження із забезпеченням максимального значення ККД у квазісталих режимах

Як показали попередні дослідження [16] існує можливість підвищення енергоефективності асинхронних двигунів, яка полягає в урахуванні реальних режимів експлуатації в процесі оптимального проектування. Реалізуємо запропоновану концепцію (див. п. 6.3) на прикладі оптимального проектування симетричного трифазного асинхронного двигуна з пульсуючим навантаженням при його живленні симетричною трифазною напругою за допомогою розробленої динамічної математичної моделі (див. п. 2.3 Розділ 2). Визначимо резерв підвищення коефіцієнта корисної дії у робочих режимах. Слід підкреслити, що адекватність математичного моделювання квазісталих режимів АД на основі цієї моделі підтверджено шляхом порівняння результатів чисельних розрахунків робочих режимів трифазного дво полюсного асинхронного двигуна АИВ71А2Ф2 потужністю 370Вт з даними його експериментальних досліджень у складі поршневих двоциліндрових компресорів ВС-400 й ВС-800 (див. п. 4.3 Розділ 4).

Пошук оптимальних параметрів АД за критерієм максимуму ККД у квазісталих режимах виконано на прикладі двигуна 4А80А6У3 (див. п.4.4) [17]. Розрахунки проведено для моменту навантаження двоциліндрового компресора,

середнє значення якого $M_{ср} = 3,33 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Коефіцієнт корисної дії розраховано за формулою (2.12), потужність P_1 – за виразом

$$P_1 = P'_1 + P_{cm} = \int_t^{t+T_n} \left(\sum_{k=1}^m u_k(t) \cdot i_k(t) \right) dt + P_{cm}, \quad (6.7)$$

де P'_1 – сума потужностей, що споживаються фазами, P_{cm} – втрати у сталі в зубцях і ярмі статора.

Для виключення впливу сторонніх факторів розрахунків квазісталих і сталих режимів АД і процедури їх оптимального проектування виконано на одній і тій же математичній моделі (п. 2.3 розділ 2) з використанням розробленої концепції (п. 6.3). Необхідно підкреслити, що метод оптимізації повинний забезпечити ефективний пошук оптимальних варіантів ЕМПЕ в умовах можливих значних витрат машинного часу при дослідженні їх квазісталих режимів. З метою скорочення часу розрахунків та підвищення ефективності цього процесу використано метод планування експерименту для формування аналітичних залежностей функції мети двигунів у квазісталих режимах від їх параметрів.

Пошук оптимального варіанта АД поділено на два етапи: одержання аналітичної залежності зміни ККД у функції параметрів оптимізації й оптимізацію отриманої залежності за максимальним значенням ККД. На першому етапі застосовано метод планування експерименту для побудови регресійної моделі [81]. Використано ортогональний центрально-композиційний план (ОЦКП) другого порядку, який описано рівнянням (2.23). Завдяки розрахунку коефіцієнтів за виразом (2.24) отримано аналітичні функції зміни ККД для квазісталої і сталої режимів [17].

Як параметри оптимізації обрано довжину пакету статора ($X_1 = l$) і число ефективних провідників у пазу статора ($X_2 = sp_1$). Інтервали варіювання змінних прийнято на рівні $\pm 10\%$ від їх середніх значень, що відповідають довжині і числу ефективних провідників у пазу статора двигуна 4А80А6У3 (табл. 6.1). Матриця планування експерименту однакова для квазісталих і сталих режимів (табл. 6.2).

Таблиця 6.1

Незалежні змінні та їх кодовані значення

Кодовані значення факторів x_i	Незалежні змінні (фактори)	
	$X_1 = l, \text{ м}$	$X_2 = sp_1$
Нижній рівень, $x_1 = -1$	0,702	74
Верхній рівень, $x_2 = +1$	0,0858	90
Середнє значення, $x_{cp} = 0$	0,078	82

Досліджено квазісталі режими з використанням динамічної моделі для дев'яти варіантів двигунів при варіюванні їх конструктивних параметрів згідно матриці планування ОЦКП другого порядку (табл. 6.2) та розраховано згідно запропонованого алгоритму (див. п. 2.2) інтегральні значення їх коефіцієнтів корисної дії.

Таблиця 6.2

Матриця планування ОЦКП та результати розрахунків

Номер досліджу	Кодовані значення факторів						Результати розрахунків					
	x_0	x_1	x_2	$x'_3 = x_1^2 - \frac{2}{3}$	$x'_4 = x_2^2 - \frac{2}{3}$	$x_5 = x_1 \cdot x_2$	Y_2	$\hat{Y}_2$	$\Delta_2, \%$	Y_1	$\hat{Y}_1$	$\Delta_1, \%$
1	+1	-1	-1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	+1	55,38	53,976	-1,08	51,43	53,969	-4,9
2	+1	+1	-1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	72,0	72,392	-0,54	65,81	64,455	-2,06
3	+1	-1	+1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	74,75	74,442	0,41	58,52	59,909	-2,37
4	+1	+1	+1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	+1	76,87	76,358	0,67	62,6	61,095	2,4
5	+1	-1	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	67,89	67,604	0,42	57,89	53,959	6,79
6	+1	+1	0	$\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	76,65	76,77	-0,16	55,44	59,295	-6,95
7	+1	0	-1	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	67,12	66,134	1,47	61,94	60,744	1,93
8	+1	0	+1	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	76,53	77,35	-1,07	60,43	61,534	-1,83
9	+1	0	0	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	73,74	74,137	0,22	58,07	58,159	0,15

Визначивши матрицю коефіцієнтів регресії $[B]$ за формулою (2.24) отримано вперше аналітичну залежність ККД у квазісталому режимі з врахуванням періодичного навантаження ($\eta_{кв}$) у вигляді поліному функції $\hat{Y}_1$ від кодованих значень параметрів оптимізації

$$\eta_{кв} = 58,159 + 2,668 \cdot x_1 + 0,395 \cdot x_2 - 1,532 \cdot x_1^2 + 2,98 \cdot x_2^2 - 2,575 \cdot x_1 \cdot x_2. (6.8)$$

Графічна реалізація залежності $\eta_{кв} = f(l, sp_1)$ наведено на рис. 6.1.

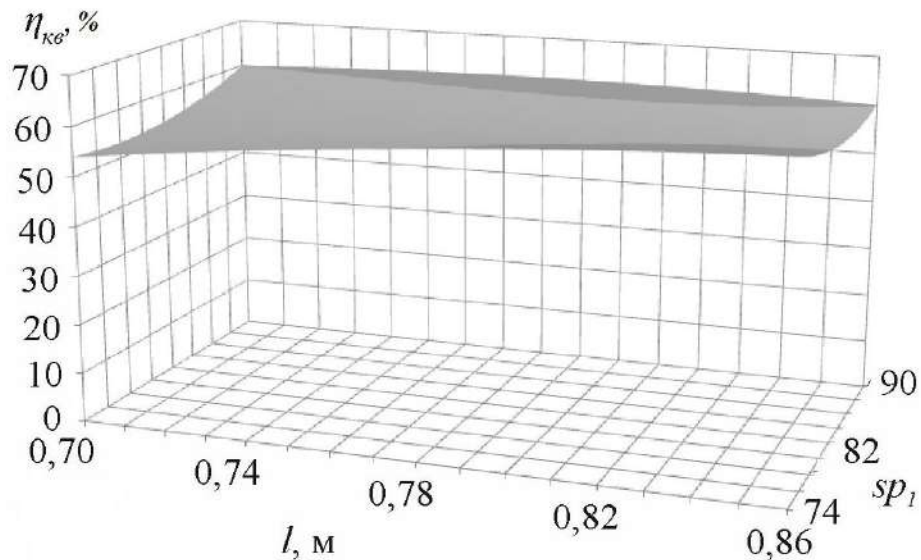


Рис. 6.1 Залежності $\eta_{кв} = f(l, sp_1)$ у квазісталому режимі

Для оптимізації виразу (6.8) використана стандартна функція оптимізації з обмеженнями `fmincon`, яка реалізована в середовищі Matlab [89]. У табл. 6.2 також представлено значення функції $\hat{Y}_1$, які обчислено за поліномом (6.8), та розрахункові значення (Y_1), отримані за допомогою математичного моделювання. Точність розрахунків квазісталіх режимів оцінено за похибкою Δ_1

$$\Delta_1 = \frac{Y_1 - \hat{Y}_1}{Y_1} \cdot 100\%. (6.9)$$

Максимальне значення похибки розрахунків Δ_1 не перевищує 7% (табл. 6.2). У результаті оптимізації залежності (6.8) отримано максимальне значення функції мети $f = 64,455$ в точці поверхні відклику, що відповідає кодованим значенням факторів $x_1 = 1$; $x_2 = 1$ (табл. 6.2) і відрізняється від результату математичного моделювання (варіант двигуна №1, табл. 6.3) на 1,4%.

Використовуючи динамічну математичну модель за умови сталого моменту опору та моменту інерції $J = \infty$, виконуємо розрахунки значень ККД у сталому режимі (η_c), що позначено Y_2 , для низки дослідів згідно матриці планування (табл.6.2). Визначивши матрицю коефіцієнтів регресії $[B]$ згідно (2.24), отримано вперше аналітичну залежність ККД у сталому режимі у вигляді поліному функції $\hat{Y}_2$ (6.10), графічна реалізація якої $\eta_c = f(l, sp_1)$ представлена на рис. 6.2.

$$\eta_c = 74,137 + 4,583 \cdot x_1 + 5,608 \cdot x_2 - 1,95 \cdot x_1^2 - 2,395 \cdot x_2^2 - 3,625 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (6.10)$$

Таблиця 6.3

**Розрахунки показників квазісталіх і сталих режимів АД
при варіюванні довжиною пакету та числом провідників обмотки статора**

Варіанти АД, режими		Параметри оптимізації		Показники режимів					
		$l, \text{м}$	sp_1	$J \cdot 10^{-3},$ $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	$P_2,$ Вт	$P_1,$ Вт	$s,$ $\%$	I_{sa}, I_{sb} $I_{sc}, \text{А}$	$\eta,$ $\%$
1 -оптимальний варіант у квазісталому режимі		0,0858	74	4,6	325,9	495,8	2,50	1,77, 1,765 1,769	65,73
2- оптимальний варіант у сталому режимі		0,0803	84	∞	364,7	477,3	3,42	1,313,1,313 1,313	76,41
3- квазісталий режим АД з оптимальними параметрами у сталому режимі		0,0803	84	4,6	312,9	555,7	3,22	1,92, 1,94 1,905	56,31
Базовий двигун 4А80А6У3									
4	Сталий $M_c = f(\gamma)$	0,078	82	∞	388,9	515,9	3,*425	1,461 1,461,1,461	75,38
	Квазісталий $M_c = \text{const}$			4,6	338,5	457,4	2,927	1,42,1,42 1,42	74,0
	Квазісталий $M_c = f(\gamma)$			4,6	315,4	543,3	2,918	1,935, 1,943,1,920	58,07

Отримана аналітична модель $\eta_c = f(l, sp_1)$ забезпечує досить високу точність розрахунків. Максимальна похибка не перевищує 1,5% (табл. 6.2). У результаті розрахунків одержано максимальне значення ККД = 77,47% у точці з координатами $x_1 = 0,293$ і $x_2 = 0,949$, що в дійсному масштабі відповідає довжині пакета статора $l = 0,0803 \text{ м}$ і числу провідників в пазу статора $sp_1 = 84,4$.

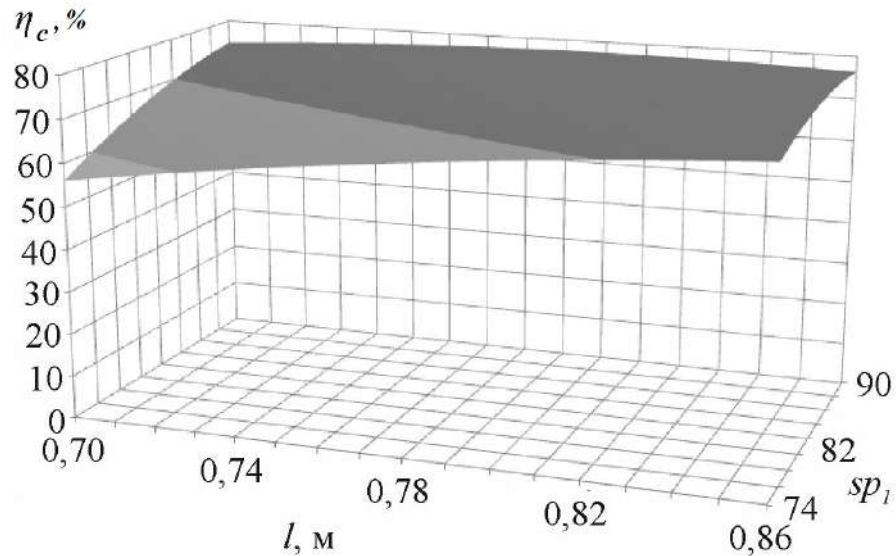


Рис. 6.2 Залежності $\eta_c = f(l, sp_1)$ у сталому режимі

Асинхронний двигун (з параметрами: $X_{1c}^* = l = 0,0803$ м, $X_{2c}^* = sp_1 = 84$), який позначено як варіант №2 (табл. 6.3), дозволив підвищити ККД у сталому режимі лише на 1 % в порівнянні з серійним (варіант №4).

Таким чином, отримано дві залежності ККД асинхронного двигуна від довжини пакета і числа провідників в пазу статора за їх зміни у межах $\pm 10\%$: для квазісталого (6.8) і сталого (6.10) режимів. За результатами їх оптимізації з'ясовано, що максимальні значення ККД у квазісталому ($\eta_{кв}^* = 64,45\%$) і сталому режимах ($\eta_c^* = 77,47\%$) відрізняються на 13%.

Визначимо згідно розробленої концепції (див. п. 4.3 ж) ступінь підвищення ККД двигуна 4А80А6УЗ двоциліндрового компресора у квазісталих режимах шляхом порівняння результатів його оптимального проектування з врахуванням пульсуючого навантаження з результатами оптимального проектування у сталому режимі. Для цього розраховано максимальне значення ККД у квазісталому режимі АД за оптимальними параметрами у сталому режимі (варіант №3 табл. 6.3), що становить $\eta_{кв}(x_{1c}^*, x_{2c}^*, \dots, x_n^*) = 56,31\%$, та визначено відповідні конструктивні

параметри АД. Отримано резерв (8%) підвищення ККД у квазісталому режимі асинхронного двигуна двоциліндрового компресора (в умовах тривалої роботи).

Таким чином, за допомогою чисельних досліджень обґрунтовано підвищення енергоефективності асинхронних двигунів шляхом їх оптимального проектування з врахуванням квазісталених режимів, який знаходиться на рівні 10%.

6.5 Визначення оптимальних значень ємності робочого конденсатора АКД і моменту інерції привода ГПК із забезпеченням максимальних ККД у квазісталених режимах

Попередні розрахунки (див. п. 4.5) показали, що при періодичному навантаженні ККД асинхронних конденсаторних двигунів знижується ($\Delta\eta = 9,6\%$) у порівнянні з постійним навантаженням, що дорівнює його середньому значенню. Визначимо оптимальні значення ємності робочого конденсатора C_p і моменту інерції J привода ГПК на прикладі АКД потужністю 30 Вт ($J = 0,00003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{pn} = 1,5 \text{ мкФ}$, $M_{cp} = 0,18 \text{ Н} \cdot \text{м}$), які забезпечують максимальні значення їх ККД в робочих режимах [21]. Для одержання аналітичних залежностей ККД від обраних параметрів оптимізації у квазісталених режимах для періодичного й постійного навантажень використано ортогональний план другого порядку МПЕ. Інтервали варіювання змінних обрано на рівні $\pm 20\%$. Розрахункові значення показників цих режимів АКД потужністю 30 Вт при варіюванні ємністю робочого конденсатора від 1,5 до 3,5 мкФ та моменту інерції – від $3,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ до $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ наведено в табл. 6.4.

За результатами розрахунків отримано аналітичні залежності функцій мети від параметрів оптимізації для періодичного (Y_1) – рис.6.3 і еквівалентного постійного (Y_2) навантаження – рис.6.4.

$$Y_1 = 28,92 + 3,07 \cdot x_1 + 1,825 \cdot x_2 - 0,805 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (6.11)$$

Таблиця 6.4

Значення ККД у квазісталих режимах за зміни ємності робочого конденсатора і моменту інерції асинхронного приводу

Рівні варіювання кодованих значень факторів	Незалежні змінні (фактори)		Коефіцієнт корисної дії, %	
	$X_1 = J$	$X_2 = C_p$	Тип навантаження	
			$M_c = const$	$M_c = f(\gamma)$
Нижній рівень -1	$3,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	1,5 мкФ	32,84	23,2
Верхній рівень +1	$4,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	3,5 мкФ	37,22	33,0
Середнє значення 0	$3,5 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	2,5 мкФ	36,18	30,24

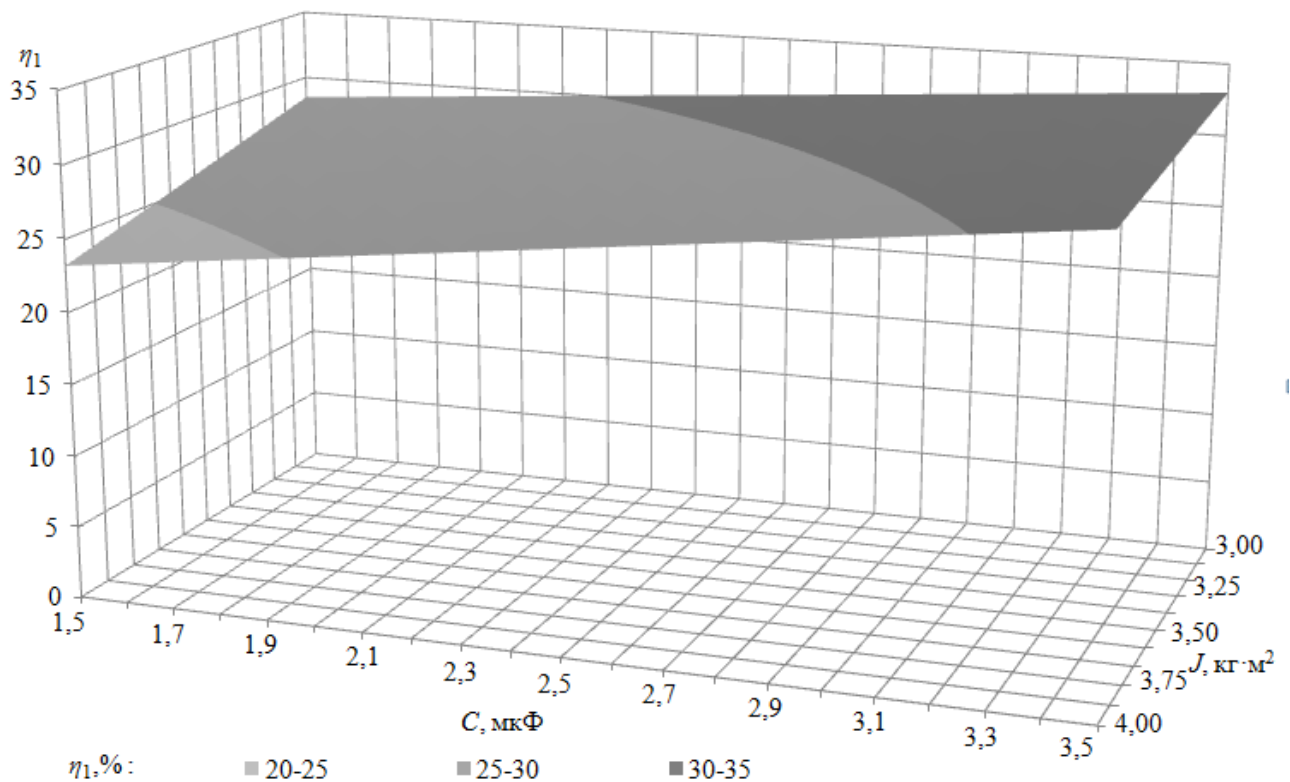


Рис. 6.3 Залежність $\eta_{кв} = f(J, C_p)$ для $M_c = f(\gamma)$

Як показали розрахунки, план другого порядку дає задовільну точність: похибка в нульовій точці плану не перевищує 4,5%. Аналіз до залежностей (6.11) і (6.12) показав, що у випадку періодичного навантаження ККД змінюється в широкому діапазоні – від 23,3% до 33%. Це підтверджує необхідність оптимального проектування АКД з врахуванням особливості навантаження.

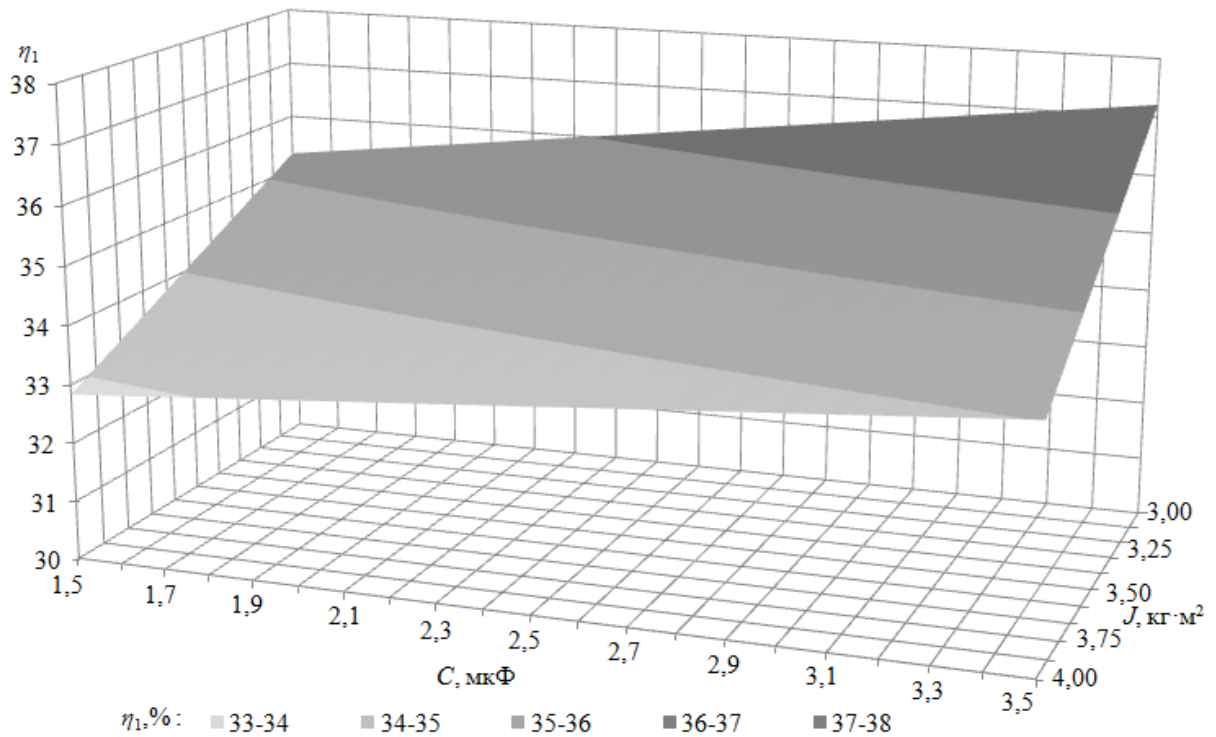


Рис. 6.4 Залежність $\eta_c = f(J, C_p)$ для $M_c = const$

$$Y_2 = 34,84 + 0,775 \cdot x_1 + 1,415 \cdot x_2 + 0,185 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (6.12)$$

Визначено момент інерції $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ і ємність робочого конденсатора $C_p = 3,5 \text{ мкФ}$, які забезпечують максимальне значення ККД (33%) при змінному навантаженні. Таким чином, завдяки використанню оптимальних значень обраних параметрів можна підвищити ККД асинхронних конденсаторних двигунів одноциліндрових поршневих компресорів у квазісталих режимах, наприклад чотириполюсного АКД потужністю 30 Вт від 4% (з параметрами $J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_p = 2,5 \text{ мкФ}$ та ККД = 29%) до 10% в порівнянні з базовим АКД ($J = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{pn} = 1,5 \text{ мкФ}$, ККД = 23,3%).

6.6 Розроблення концепції оптимального проектування вентиляно-індукторних двигунів з використанням методу планування експерименту

Досвід проектування вентильно-індукторних двигунів засвідчує про необхідність визначення оптимальних геометричних розмірів зубцевих зон статора й ротора, які дозволяють задовольнити певним вимогам, зокрема, максимальному значенню електромагнітного моменту, мінімальному значенню рівня його пульсацій тощо. Форма електромагнітного моменту ВІД практично співпадає з формою струму, їх пульсації тяж. Тому питання зменшення пульсацій необхідно вирішувати вже на попередньому етапі проектування.

У науково-технічних працях присутні різні рекомендації щодо вибору геометрії вентильно-індукторних машин. Більш з них спираються на аналітичні приблизні вирази [103, 190, 228]. Для визначення співвідношення зовнішнього і внутрішнього діаметрів статора користуються загальними рекомендаціями (пропонується обирати у діапазоні 1,54...2,2 [104], 1,6...2,0 [105]), або обирають за критеріями [41].

Уточненню конструктивних параметрів ВІД сприяє використання польових і коло-польових моделей [163, 177]. Суттєвим фактором при проектуванні геометрії ВІД є вибір параметрів, які впливають на розподіл магнітного поля, а також на величину електромагнітного моменту. Залежність електромагнітного моменту від кута повороту ротора ВІД оцінюється за середнім електромагнітним [41, 84] і максимальним пусковим моментом [41] та за коефіцієнтом пульсацій моменту [140]. В якості параметрів обирають або коефіцієнти полюсного перекриття [104, 165, 189, 228, 233], або кутові значення полюсів статора і ротора [159, 226, 233]. Однак, рекомендовані їх співвідношення є суперечливими [64, 103, 165, 189, 228, 233]. Уточнити значення коефіцієнтів полюсного перекриття та отримати найбільш точні рекомендації по їх вибору можна на основі розрахунку магнітного поля магнітних структур електричних машин методом скінчених елементів.

В даному розділі представлено концепцію оптимального проектування вентильно-індукторних двигунів з використанням аналізу магнітних структур методом скінчених елементів, яка базується на отриманні аналітичних залежностей електромагнітного моменту і його пульсації від конструктивних параметрів статора і ротора, що дозволяє розробити геометрію індукторної машини із забезпеченням

заданого електромагнітного моменту і мінімальних його пульсацій [23]. Проведено порівняння отриманих результатів з попередніми дослідженнями.

6.6.1 Етапи оптимального проектування вентильно-індукторних двигунів

Оптимальне проектування вентильно-індукторних двигунів представлено трьома етапами. На першому етапі здійснюється вибір варіанту геометрії ВІД за максимальним значенням середнього електромагнітного моменту на періоді комутації [23], який включає:

- формування критеріїв досліджень;
- формування обмежень (зовнішнього діаметра, величини індукції, густини струму і т. і.);
- обґрунтування та вибір конфігурації ВІД (співвідношення кількості полюсів статора і ротора), геометричних розмірів статора і ротора, типу комутації;
- визначення незалежних змінних (діаметра розточування D_i і кутових величин полюсів статора β_s і ротора β_r) та діапазонів їх варіювання;
- моделювання варіантів досліджуваних магнітних систем вентильно-індукторних двигунів при варіюванні незалежних змінних відповідно методу планування експерименту;
- дослідження магнітних структур ВІД та визначення їх максимального та середнього електромагнітних моментів на періоді комутації методом скінчених елементів;
- отримання аналітичних залежностей електромагнітних моментів від конструктивних параметрів D_i і β_s ;
- дослідження отриманої функції на екстремум та вибір варіанту двигуна за максимальним середнім значенням електромагнітного моменту на періоді комутації та заданими обмеженнями, визначення внутрішнього діаметру статора для наступного етапу.

На другому етапі визначається геометрії статора і ротора ВІД, що забезпечує мінімальні пульсації електромагнітного моменту за його необхідним середнім значенням, який складається з [23]:

- формування обмежень і критерію досліджень;
- визначення незалежних змінних кутових величин полюсів статора і ротора;
- моделювання варіантів ВІД за обраними незалежними змінними;
- дослідження варіантів магнітних структур та розрахунків середніх електромагнітних моментів ВІД методом скінчених елементів;
- отримання аналітичної залежності коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту ВІД за зміни кутових величин полюсів статора й ротора;
- визначення варіанту з найменшими пульсаціями електромагнітного моменту на періоді комутації для заданого його значення.

Третій етап містить: дослідження динамічних режимів ВІД зі змінним навантаженням за допомогою комплексних математичних моделей; *визначення* пульсацій електромагнітних моментів, струмів і частоти обертання ротора в робочих режимах за зміни напруги живлення, кутів комутації і навантаження; розрахунок втрат і коефіцієнта корисної дії; *формування* характеристик робочих режимів вентильно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням та розроблення заходів по підвищенню енергоефективності і надійності конкретного обладнання за обраними критеріями оцінки квазісталих режимів, наприклад максимального ККД і мінімальних пульсацій частоти обертання ротора герметичних компресорів.

6.6.2 Вибір варіанту ВІД із забезпеченням максимального середнього електромагнітного моменту

Формування критеріїв досліджень, таблиці значень незалежних змінних. Структура ВІД ідеально підходить до їх використання у складі герметичних одноциліндрових поршневих компресорів. Тому, саме це обладнання обрано у якості ЕМС для досліджень. Двигуни поршневих компресорів є вбудованими, складаються зі статора й ротора та виготовляються без вала. На рис. 6.5

представлено пакети статора і ротора однофазного асинхронного двигуна. При цьому геометрія листів статора має особливість: пази різної форми, форма листа наближена до прямокутника (на рис. 6.6).

На першому етапі метою дослідження є отримання максимального середнього значення статичного електромагнітного моменту ВІД для заданого зовнішнього діаметра статора шляхом варіювання внутрішнього діаметра і кутової величини полюса статора [23]. В якості функції цілі обрано середній $Y1 = M_{cp}$ і максимальний $Y1 = M_{max}$ електромагнітні моменти ВІД.

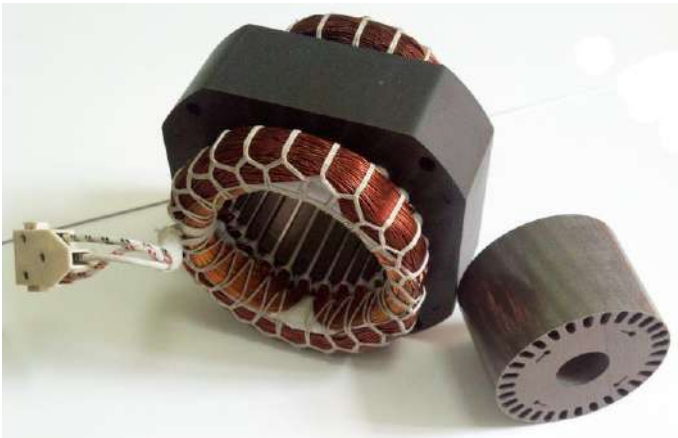


Рис. 6.5 Конструкція електродвигунів ГПК

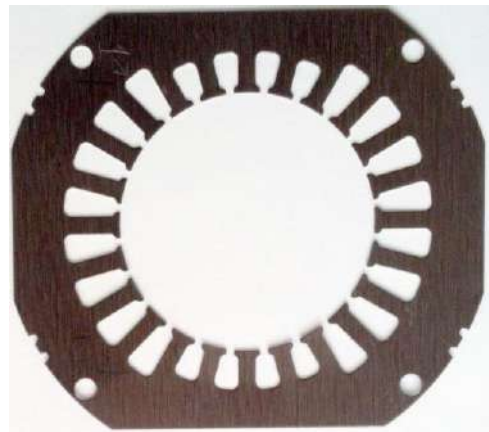


Рис. 6.6 Лист статора ОАД ГПК

Моделювання проведено для одиночної симетричної комутації ВІД базової конфігурації 6/4, що розробляється на основі асинхронного двигуна типу ДАО поршневих герметичних компресорів. При розрахунках прийнято обмеження: зовнішній діаметр статора $D_a = 108$ мм, який відповідає найменшій ширині листа статора (рис. 6.6), повітряний проміжок – 0,3 мм, довжина пакету статора $l_i = 34$ мм, діаметр вала ротора – 18 мм (рис. 6.7).

В якості незалежних змінних обрано внутрішній діаметр (розточування) D_i і кутову величину полюса статора β_s , базова величина якої визначається як:

$$\beta_s = \frac{360^\circ}{2 \cdot z_s} = 30^\circ. \text{ Мінімальне значення } \beta_s \text{ вибрано рівним тактовому куту } e \text{ при}$$

симетричній комутації [84, 105]

$$e = \frac{2\pi}{\xi \cdot z_r} = \frac{2\pi}{3 \cdot 4} = \frac{\pi}{6}, \quad (6.13)$$

де ξ – кількість тактів комутації.

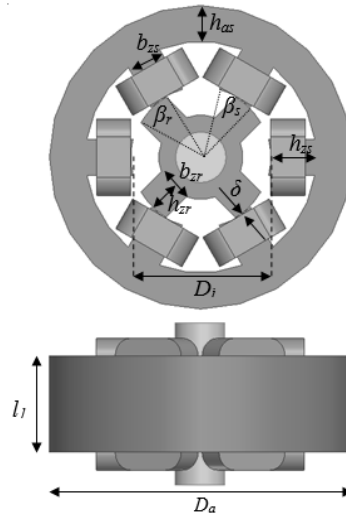


Рис. 6.7

Кількість тактів комутації дорівнює числу фаз статора m при парній або одиночній симетричній комутації. Кутова величина полюса ротора (кут перекриття ротора) при його рівності міжполюсній відстані дорівнює

$$\beta_r = \frac{360^\circ}{2 \cdot z_r} = 45^\circ. \quad (6.14)$$

Максимальне значення β_s відповідає максимальній величині у випадку

$$\beta_s \approx \beta_r = \frac{360^\circ}{2z_r} = 45^\circ. \quad (6.15)$$

При розрахунках прийнято наступні допущення: ширина зубця статора дорівнює висоті спинки статора $h_{as} = b_{zs}$; $\beta_s = \beta_r$.

Діапазони (кроки) варіювання змінних (D_i і β_s) обрано, відповідно, на рівні $\pm 20\%$ і $\pm 25\%$ (табл. 6.5). Геометричні розміри листів статора і ротора індукторної машини за зміни D_i і $\beta_s = 30^\circ$ представлено у табл. 6.6.

Розроблення та дослідження магнітних систем Для кожного із варіантів побудовано відповідні моделі магнітних систем. Для кожної з моделей визначена картина поля, розраховано магнітну індукцію в елементах магнітопровода статора і

ротора та у повітряному проміжку (рис. 6.8) і електромагнітний момент ВІД (рис. 6.9) при різних кутах повороту ротора.

Таблиця 6.5

Значення незалежних змінних

Незалежні змінні	Базовий рівень x_0 (0)	Крок варіювання Δ_0	Нижній рівень (-1)	Верхній рівень (+1)
$X_1 = D_i$, мм	50	10	40	60
$X_2 = \beta_s$, град	30	7,5	22,5	37,5

Таблиця 6.6

Геометричні розміри листів статора і ротора індукторної машини

D_i , мм	h_{zs} , мм	b_{zs} , мм	h_{as} , мм	b_{zR} , мм	h_{zR} , мм
50	15,6	13,4	13,4	18,9	11,4
60	23,4	16,1	16,1	22,5	13,3
40	7,8	10,7	10,7	15,3	9,5

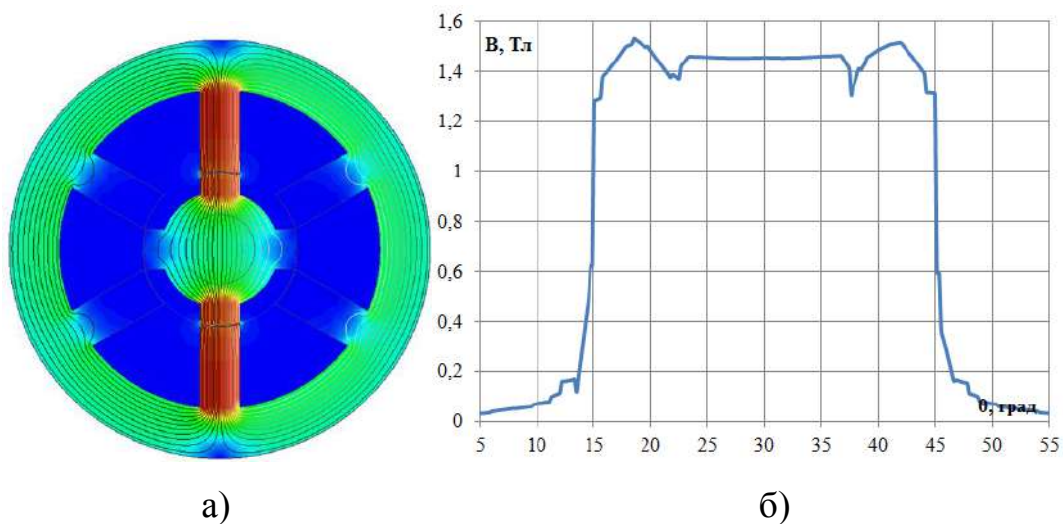


Рис. 6.8 Картина поля в положенні магнітної рівноваги (а) і відповідний графік розподілу індукції магнітного поля в повітряному проміжку ВІД (б)

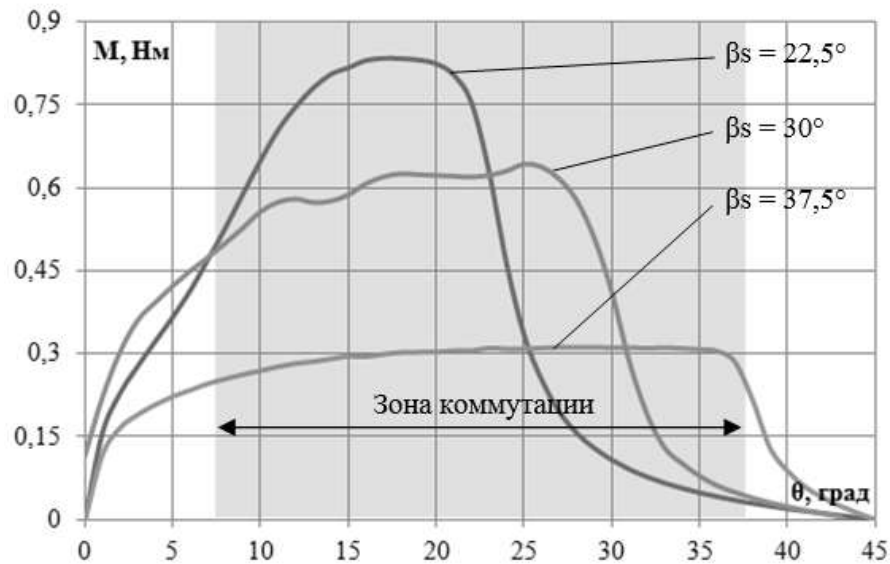


Рис. 6.9 Залежності електромагнітних моментів від кута повороту ротора ВІД з внутрішнім діаметром статора 40 мм при різних значеннях β_s

Для отримання аналітичних залежностей середнього і максимального амплітудного моментів ВІД при варіюванні діаметром розточення та кутової величиною полюса статора $M_{cp} = f(D_i, \beta_s)$ і $M_{макс} = f(D_i, \beta_s)$ був використаний ортогональний план другого порядку МПЕ. В результаті розрахунків вперше отримано аналітичні залежності [23] для середнього (6.16) і максимального (6.17) електромагнітних моментів ВІД

$$M_{cp} = 0,2769 - 0,1164 \cdot x_1 - 0,0985 \cdot x_2 + 0,0322 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (6.16)$$

$$M_{макс} = 0,4403 - 0,1324 \cdot x_1 - 0,1321 \cdot x_2 + 0,1287 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (6.17)$$

Точність результатів розрахунків (6.17) і (6.18) визначено за формулою (6.9). Похибка в центральній точці плану для рівняння (6.17) складає 3,3%, для (6.18) – 31%, що є незадовільним. Для отримання аналітичної залежності максимального моменту ВІД при варіюванні внутрішнім діаметром статора та кутової величини полюса статора скористаємося ортогональним централью-композиційним планом

другого порядку. З урахуванням матриці коефіцієнтів $[B] = \begin{bmatrix} +0,4706 \\ -0,1748 \\ -0,14 \\ -0,05953 \\ -0,00567 \\ +0,01984 \end{bmatrix}$ поліном,

який забезпечив похибку у центральній точці плану 5,7 %

$$M_{\max} = 0,4706 - 0,1748 \cdot x_1 - 0,14 \cdot x_2 - 0,05953 \cdot (x_1^2 - \frac{2}{3}) - 0,00567 \cdot (x_2^2 - \frac{2}{3}) + 0,01984 x_1 \cdot x_2. \quad (6.18)$$

Таким чином, отримано аналітичні залежності для максимального $M_{\max} = f(D_i, \beta_s)$ і середнього $M_{cp} = f(D_i, \beta_s)$ електромагнітних моментів ВІД при варіюванні внутрішнім діаметром (у діапазоні $\pm 20\%$) і кутовою величиною полюса статора (у діапазоні $\pm 25\%$) для сталого зовнішнього діаметра, які наведено на рис. 6.10 і рис.6.11 відповідно.

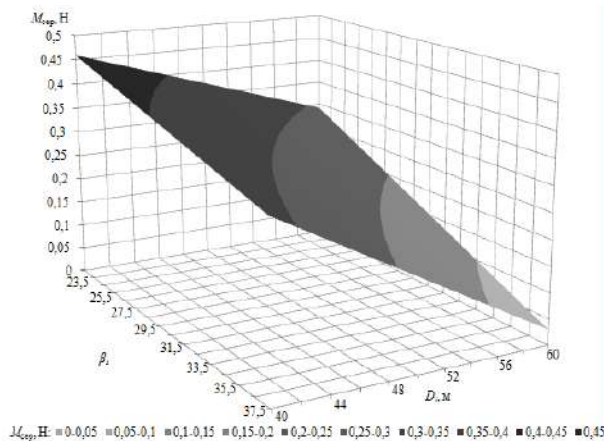


Рис. 6.10 Залежність $M_{\max} = f(D_i, \beta_s)$

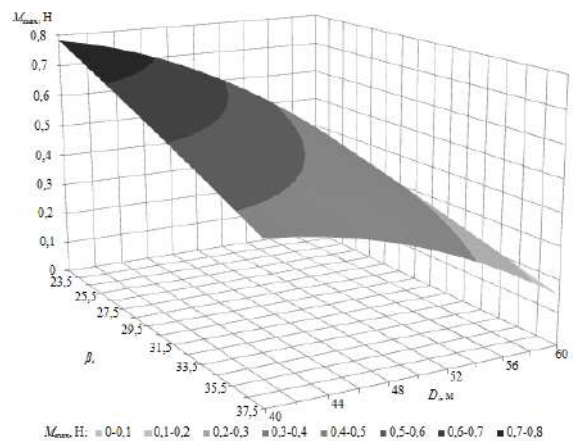


Рис. 6.11 Залежність $M_{cp} = f(D_i, \beta_s)$

З дев'яти розрахованих моделей обрано варіант з максимальними значеннями середнього ($0,52 \text{ H} \cdot \text{м}$) і амплітудного ($0,82 \text{ H} \cdot \text{м}$) електромагнітних моментів за одиночної комутації, визначено його конструктивні параметри – $D_i = 40$ і $\beta_s = 22,5^\circ$. При цьому пульсації $\Delta M = 61,5\%$.

6.6.3 Визначення геометрії зубцевих зон статора і ротора ВІД, що забезпечує мінімальні пульсації електромагнітного моменту

На другому етапі проведена серія оптимізаційних розрахунків з метою визначення геометрії листа статора, яка забезпечує мінімум пульсацій електромагнітного моменту [23]. На даному етапі в якості функції мети обраний коефіцієнт пульсацій k_{nc} , який розраховано в межах зони комутації за формулою

$$k_{nc} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{2M_{cp}} \cdot 100\%. \quad (6.19)$$

Проведено математичне моделювання магнітних систем ВІД на основі методу скінчених елементів при варіюванні β_s і β_r за умови сталих значень зовнішнього і внутрішнього діаметрів (при $D_a = \text{const}$, $D_i = \text{const}$). Діаметр розточування статора ($D_i=40$ мм) відповідає варіанту, який визначено на першому етапі. Обрано мінімальні і максимальні значення (нижній і верхній рівні діапазону віріювання змінних) кутових величин полюсів статора і ротора: $\beta_s: 22,5^\circ$ і $37,5^\circ$ і $\beta_r: 30^\circ$ і 45° відповідно. Їх значення для базового рівня на цьому етапі: $\beta_s = 30^\circ$, $\beta_r = 37,5^\circ$. Варіанти магнітних систем приведено у табл. 6.7.

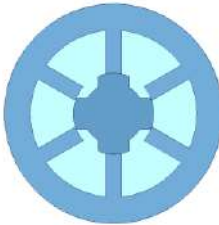
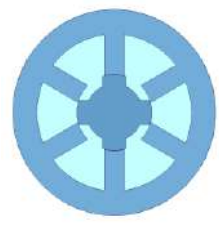
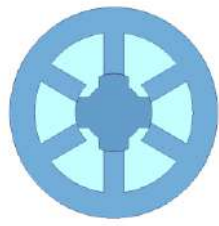
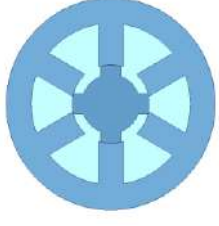
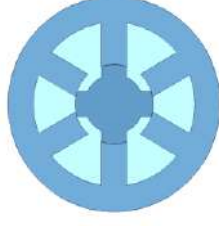
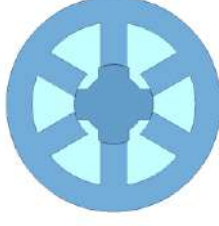
В результаті серії розрахунків вперше отримана аналітична залежність для визначення коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту ВІД за зміни кутових величин полюсів статора і ротора у межах зони комутації [23]

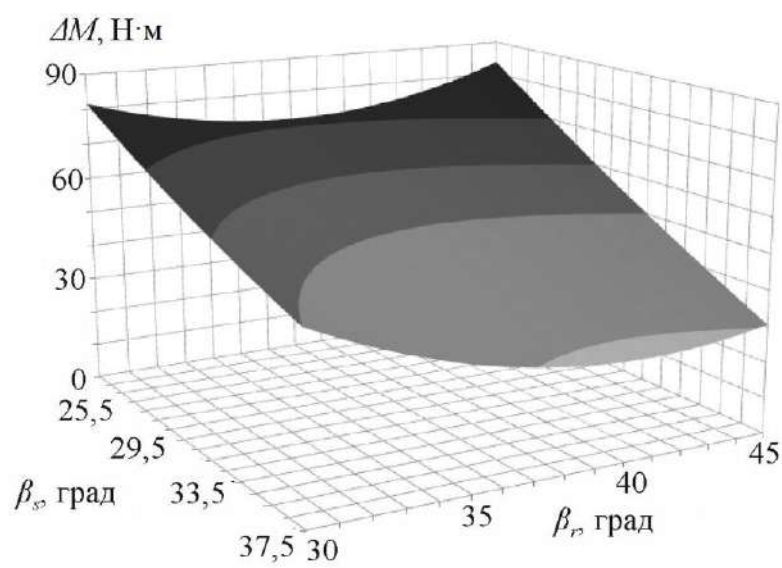
$$\begin{aligned} k_{nc} = & 57,18 - 21,15 \cdot x_1 - 4,333 \cdot x_2 + 1,817 \left(x_1^2 - \frac{2}{3} \right) + \\ & + 10,97 \cdot \left(x_2^2 - \frac{2}{3} \right) - 5,375 x_1 \cdot x_2. \end{aligned} \quad (6.20)$$

Результати розрахунків за виразом (6.20) наведено у табл. 6.8, графічна реалізація двовимірної залежності $k_{nc} = f(\beta_s, \beta_r)$ – на рис. 6.12.

Визначено мінімальне значення коефіцієнта пульсацій електромагнітного момента $k_{nc} = 25,2\%$ (яке відповідає $\Delta M_{\min} = 50,4\%$) для варіанта з $\beta_s = \beta_r = 37,5^\circ$ з коефіцієнтами полюсного перекриття статора $\alpha_s = 0,639$ і ротора $\alpha_r = 0,404$.

Варіанти магнітних систем

	$\beta_r = 30^\circ$	$\beta_r = 37,5^\circ$	$\beta_r = 45^\circ$
$\beta_s = 22,5^\circ$			
$\beta_s = 30^\circ$			
$\beta_s = 37,5^\circ$			

Рис. 6.12 Залежність $k_{nc} = f(\beta_s, \beta_r)$

Результати розрахунків коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту ВІД

$Y_{(MCE)}$	$\hat{Y}_{(MPE)}$	$\Delta_1, \%$
79,8	81,35	-1,94
51,3	50,2	2,15
84,2	83,84	0,43
33,4	30,39	9,02
72,8	71,62	1,62
25,2	29,32	14,0
64,4	63,96	6,9
51,9	55,3	6,54
51,6	48,66	5,7

Шляхом дослідження аналітичної функції (6.20) на екстремум визначено оптимальні параметри варіанта ВІД ($D_i = 40$ мм, $\beta_r = 40,5^\circ \dots 41^\circ$, $\beta_s = 37,5^\circ$), які забезпечують необхідне середнє значення електромагнітного моменту ($0,4$ Н·м) з мінімальними пульсаціями. Слід відзначити, що даному технічному рішенню (для визначених β_s та β_r) відповідають $\alpha_s = 0,648$ і $\alpha_r = 0,409$. Отримані результати корелюються з роботами [65, 161].

Третій етап представлено у вигляді розв'язання задачі щодо формування характеристик робочих режимів ВІД ГПК при регулюванні напруги живлення і кутів комутації із забезпеченням критеріїв ефективності – максимальних значень ККД і регламентованого рівня пульсацій частоти обертання роторів у робочому діапазоні з врахуванням періодичного навантаження (п.5.3.4 Розділ 5).

Посилання [16, 17, 21, 23, 31, 41, 65, 67, 81, 84, 103 – 105, 140, 159, 161, 165, 190, 228, 233] див. список використаних джерел стор. 275 – 299.

6.7 Висновки до розділу 6

1. Розвинуто концепцію оптимального проектування асинхронних двигунів з врахуванням перехідних процесів за умови змінного навантаження, яка базується на

отриманих аналітичних залежностях ККД у квазісталих режимах від конструктивних параметрів та дозволяє підвищити енергоефективність двигунів в робочих режимах.

2. На основі запропонованого підходу науково обгрунтована можливість підвищення ККД асинхронних двигунів у квазісталих режимах до 8...10% у порівнянні з традиційним оптимальним проектуванням для ustalених режимів. Це доведено на прикладі шестиполісного двигуна 4A80A6Y3 потужністю 750 Вт з пульсуючим навантаженням за допомогою отриманих вперше аналітичних залежностей ККД при варіюванні довжини пакета і числа ефективних провідників обмотки статора у діапазоні $\pm 10\%$ та до 5% – для асинхронних конденсаторних чотириполісних двигунів потужністю 30 Вт одноциліндрових компресорів завдяки вибору оптимальних ємностей робочих конденсаторів при їх варіюванні у діапазоні $\pm 20\%$.

3. Розвинуто концепцію оптимального *проектування* вентильно-індукторних двигунів, яка базується на використанні аналітичних залежностей максимального і середнього електромагнітного моментів та його пульсацій від внутрішнього діаметра статора і кутових величин полюсів статора і ротора при одиночній симетричній комутації, що дозволяє підвищити ефективність проектування ВІД і отримати оптимальний його варіант із заданим середнім електромагнітним моментом з мінімальними пульсаціями. За допомогою запропонованого підходу розроблено оптимальну геометрію статора і ротора ВІД базової конфігурації 6/4 (за зміни внутрішнього діаметру і кутових величин полюсів статора і ротора відповідно у діапазонах $\pm 20\%$ і $\pm 25\%$) з оптимальними параметрами: $D_i = 40$ мм, $\beta_r = 40,5^\circ \dots 41^\circ$, $\beta_s = 37,5^\circ$, що забезпечує середнє значення електромагнітного моменту 0,4 Н·м з мінімальним коефіцієнтом пульсацій 25% двигуна герметичного поршневого компресора.

РОЗДІЛ 7

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗІ ЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ НА ОСНОВІ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИХ ТА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Комплекс розроблених математичних засобів представлений у попередніх розділах, який включає математичні моделі, концепції оптимального проектування та принципи керування асинхронних і вентильно-індукторних двигунів з врахуванням особливостей навантаження, дозволяє уточнити характеристики квазісталих режимів, вдосконалити двигуни та покращити їх технічні показники у робочих режимах. У той же час це дає можливість підійти до вирішення проблеми підвищення ефективності ЕМС насосного обладнання, поршневих компресорів, верстат-гойдалок на основі електромеханічних перетворювачів підвищеної енергоефективності. В роботі розглянуто двигуни малої і середньої потужності.

На основі розроблених математичних моделей з використанням критеріїв оцінки енергоефективності ЕМС зі змінним навантаженням проведено комплексне дослідження режимів роботи АД і ВІД та розроблено заходи покращення технічних характеристик насосного обладнання систем водопостачання багатоповерхових будинків та підвищення ефективності роботи верстат-гойдалок і компресорного обладнання.

7.1 Розробка заходів покращення технічних характеристик насосного обладнання

Для забезпечення енергоефективних режимів насосних комплексів на основі регульованих ЕМПЕ визначено необхідні конкретні закони і алгоритми регулювання частоти їх обертання з врахуванням характеру навантаження, за яких насоси ефективно працюють на мережу споживача, забезпечуючи потрібне значення продуктивності. Задача отримання максимальної енергоефективності обраної електромеханічної системи насосного обладнання багатоповерхових будинків

потребує обґрунтування критерію комплексної оцінки її енергоефективності, розробки комплексної математичної моделі системи, яка складається з окремих складових та враховує їх взаємний вплив (Розділ 2), адекватно відображає електромагнітні та механічні процеси, закон регулювання АД, що забезпечує діапазон зміни продуктивності насоса згідно добового графіку водопостачання. З використанням розробленої комплексної математичної моделі [27] визначено можливості підвищення енергоефективності електромеханічної системи НУ (насосної установки) багатоповерхового будинку завдяки регулюванню за законами, які сформовано у результаті чисельних досліджень. Для цього визначено критерій комплексної оцінки енергоефективності системи.

7.1.1 Обґрунтування оптимальних режимів роботи АД за зміни частоти і напруги живлення у складі насосної установки багатоповерхового будинку

Ефективність електромеханічної системи водопостачання оцінюють із визначенням ККД перетворення електричної енергії у гідравлічну або енергоефективності, яка є співвідношенням витраченої електроенергії і отриманої корисної енергії з підйому води [204]. Використання першого способу визначення критерію ефективності системи при її проектуванні і порівняльних дослідженнях не дозволяє мінімізувати втрати енергії у системі внаслідок зарахування до корисної потужності її частини, що обумовлена надлишковим напором на виході насосу та втрачається при дроселюванні у елементах гідравлічної мережі. Корисна робота такої системи полягає у підйомі заданої кількості води на потрібну висоту. Максимальна ефективність забезпечується, як стверджено у розділі 2, при створенні мінімальної потрібної гідравлічної корисної потужності на виході насосу.

Актуальним є питання визначення оптимального, наприклад, за запропонованим мінімумом витрат електричної енергії (2.33), керування приводами насосних агрегатів, які забезпечують енергоефективні режими за потрібним значенням продуктивності згідно технологічних вимог та враховуючи обмеження

щодо гідравліки ЕМС та параметрів ЕМПЕ. Для вирішення цього питання необхідний критерій комплексної оцінки енергоефективності цієї системи.

Зазвичай ефективність режимів насосного обладнання визначають за допомогою коефіцієнтів корисної дії насосу η_p , асинхронного двигуна η_{AD} та насосного агрегату η_{aep} , як відношень відповідних вихідних і вхідних потужностей

$$\eta_p = \rho g Q H_p / P_2; \quad \eta_{AD} = P_2 / P_1; \quad \eta_{aep} = \eta_p \eta_{AD}, \quad (7.1)$$

де $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – густина рідини; Q , H_p – відповідно подача і напір насоса.

Представлені ККД оцінюють, але не можуть бути критеріями ефективності електромеханічної системи НУ багатопверхового будинку при проектуванні та порівняльних дослідженнях, оскільки не враховують результуючої корисної роботи, що створює система водопостачання. Для комплексної оцінки енергоефективності цієї системи запропоновано коефіцієнт енергетичної ефективності K_{ef} [27], який визначається як відношення оптимальної гідравлічної корисної потужності системи $P_{onn} = \rho g Q H_{\min}$ з врахуванням достатнього мінімального напору насоса (за виразом 2.33) до потужності, яка споживається з електричної мережі

$$K_{ef} = P_{onn} / P_1. \quad (7.2)$$

Розраховано також ККД гідравлічних вентилів $\eta_{ГВ}$ та інтегральний добовий коефіцієнт корисної дії ЕМС насосної установки η_{EMCp}

$$\eta_{ГВ} = K_{ef} / \eta_{aep}; \quad \eta_{EMCp} = \frac{\rho g h_{cm} 0.5(k+1)}{3600 \cdot W_{1\partial}} \sum_{j=1}^{n_u} Q_j T_j, \quad (7.3)$$

де $W_{1\partial}$ – інтегральна добова характеристика споживання електричної енергії за

добу: $W_{1\partial} = \sum_{j=1}^{n_u} W_j = \sum_{j=1}^{n_u} (P_j \cdot t_j)$; t_j – проміжки часу з однаковою споживаною потужністю P_j (рис. 2.4); Q_j, T_j – подача та час у годинах j -го етапу добового графіка водопостачання (рис. 2.4); n_u – кількість етапів, а також W_j – кількість енергії, яка споживається насосним агрегатом за проміжкі часу t_j .

Особливості режимів насосної установки багатоповерхового житлового будинку полягають в існуванні незначного допустимого діапазону зміни напору, широкого діапазону зміни продуктивності (зміна витрати води від Q_n до $0,1 \cdot Q_n$) за умови обмеження (за умовами стійкості) режиму системи $H_0 \geq H_{cm}$ і допустимих знижень напруги і частоти живлення.

Математична модель гідравлічної мережі, яка описується рівнянням (2.33), за заданими витратами дозволяє розрахувати мінімальний достатній напір насоса $H_{onm} = H_{min}$ і відповідно йому – гідравлічну оптимальну корисну потужність $P_{onm} = \rho g Q H_{min}$, що характеризує корисну роботу системи. При цьому допустиме зменшення частоти живлення обмежується умовами виникнення нестійкого режиму системи – помпажу (коли напір насоса за нульової подачі H_0 стає меншим за статичний напір H_{cm}) і контролюється порівнянням статичного напору мережі і напору насоса при нульовій подачі. Допустимість зниження напруги живлення контролюється порівнянням поточної величини гріючих втрат АД із їх номінальним значенням. З урахуванням цього, математичне моделювання дозволяє визначити оптимальний закон зміни частоти і напруги живлення АД за зміни водоспоживання.

Дослідження технічних характеристик насосного обладнання проведено на прикладі відцентрового насоса типу К 20/30 з трифазним асинхронним двигуном 4А90Л2У3 потужністю 3кВт з номінальною лінійною напругою живлення $U_n = 380$ В. Згідно формул (Г.1) і (Г.2) Додатку Г розраховано залежності напору і ККД насоса від подачі і частоти його обертання [27].

Спочатку досліджено режим роботи з нерегульованим АД, визначено залежності ККД двигуна, насоса та насосного агрегату, критерій ефективності системи K_{ef} від витрати води Q згідно з добовим графіком водоспоживання багатоповерхового будинку (рис. 2.4). Результати розрахунків для номінальної фазної напруги $U = 220$ В і номінальної частоти живлення $f_n = 50$ Гц представлено у табл. М.1 (Додаток М). Кількісна оцінка виконана для семи поверхів.

Досліджено електромеханічні процеси АД у складі системи водопостачання насосного агрегату з метою визначення максимальних значень ККД насоса та

коефіцієнта енергоефективності системи, які можна досягти при варіюванні величинами напруги та частоти живлення двигуна для різних витрат води згідно рис.2.4.

Проведено дослідження режимів регулювання частоти обертання АД за максимальним значенням критерію ефективності системи водопостачання: а) при зміні частоти та напруги живлення ($H_0 = 18,1\text{м}$, $H_{cm} = 18\text{м}$) – (табл. М.2); б) за законом Костенка $U/f = \text{const}$ ($H_{cm} = 18\text{м}$) табл. М.3; в) із забезпеченням постійного (необхідного) напору $H_{\min} = 25,56\text{м}$ ($U = \text{var}$, $f = \text{var}$) в системі водопостачання будинку за максимальних витрат $Q = Q_{\max}$ згідно графіка (табл. М.4), та за максимальним значенням ККД насосного агрегату η_{agr} – при зміні частоти та напруги живлення (табл. М.5).

Для кожного режиму визначено значення напруги і частоти живлення асинхронного двигуна, які забезпечують максимальний коефіцієнт енергоефективності для витрат води (2, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, $\text{м}^3/\text{год}$) згідно за добовим графіком, розраховано η_{AD} , η_{pump} , η_{agr} , K_{ef} та інтегральні добові характеристики споживання електричної енергії за добу. У табл. М2 – М5 наведено відносні значення U^* і f^* до їх номінальних значень відповідно 380 В і 50 Гц.

Розрахунки показали [27], що для випадку, який дуже несприятливий для частотного регулювання внаслідок великої частки статичного напору ($H_{cm} = 18\text{м}$, $H_0 = 21,1\text{м}$), застосування оптимального регулювання забезпечує збільшення енергоефективності системи до 23% в порівнянні з нерегульованим приводом. Обмеження можливостей частотного регулювання пов'язано із квадратичним зниженням напору насоса відповідно до зниження частоти обертання двигуна і появою робочої точки нестійкої роботи насосу. У даному дослідженні, при відсутності можливості подальшого зниження частоти обертання магнітного поля, регулювання здійснювалось зміною напруги живлення. За умови фіксації співвідношення напруги і частоти – енергоефективність на 4% менша, ніж при оптимальному регулюванні. В результаті аналізу встановлено, що для даного

прикладу найбільший енергетичний ефект досягається, коли АД забезпечує необхідні значення продуктивності: номінальну $Q_n = 19,6 \text{ м}^3/\text{год}$ – при U_n і частоті живлення $f^* = 0,926 f_n$ і менших за номінальну (16, 13,9, 8,3, 2 , $\text{м}^3/\text{год}$) – при зміні напруги від $0,59 U_n$ до $0,39 U_n$ і сталого значення $f^* = 0,924 f_n$ (табл. Л. 2). Залежності ККД насосного агрегату від подачі (пунктирні лінії) і коефіцієнта енергетичної ефективності (суцільні лінії) для різних законів регулювання зображено на рис. 7.1.

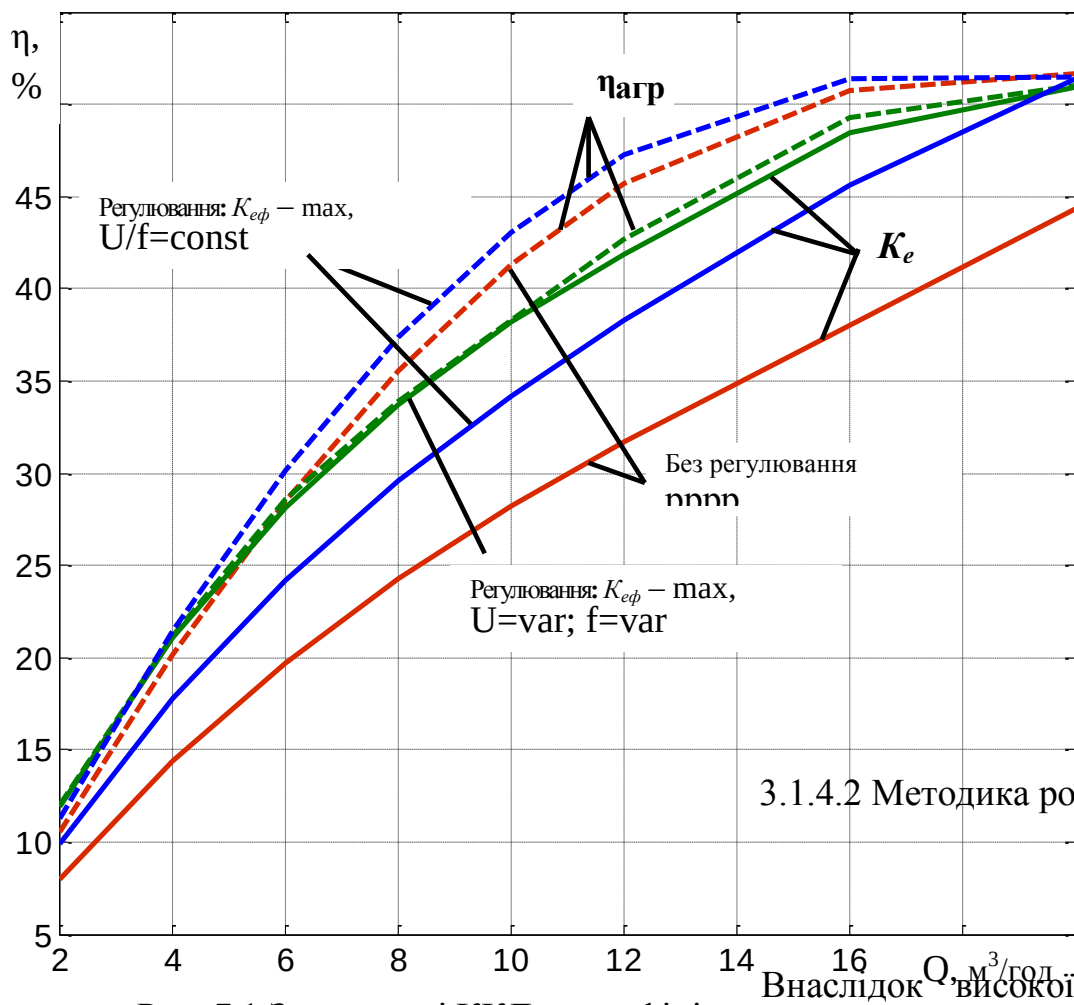


Рис. 7.1 Залежності ККД та коефіцієнта енергетичної ефективності насосного агрегату за зміни подачі

Показано, що при регулюванні напруги і частоти струму АД за встановленим законом (із забезпеченням максимального значення коефіцієнта енергоефективності) навіть співрозмірними з іншими видами регулювання, як це буває частіше, при математичному порівнянні розбіжності у чисельних розрахунках залежностей K_{ef} і η_{agr} мінімальні в порівнянні з іншими законами регулювання. Це свідчить про мінімізацію втрат струмів квадрату частоти переманічування домінуючий вклад у загальні втрати.

Найбільш точно визначити загальні втрати максимального в часі і середнього в процесі роботи

енергії у гідравлічних вентилях споживача, що ілюструє рис.7.2. Завдяки запропонованим заходам можна зменшити втрати енергії у вентилях до 30%

Результати порівняльного дослідження енерговитрат при різних режимах та законах регулювання продуктивністю системи водопостачання зведено до табл. 7.1, де наведено розрахункові величини: інтегральні добові і річні витрати електроенергії W_{10} і W_p відповідно за заданого добового графіка водоспоживання;

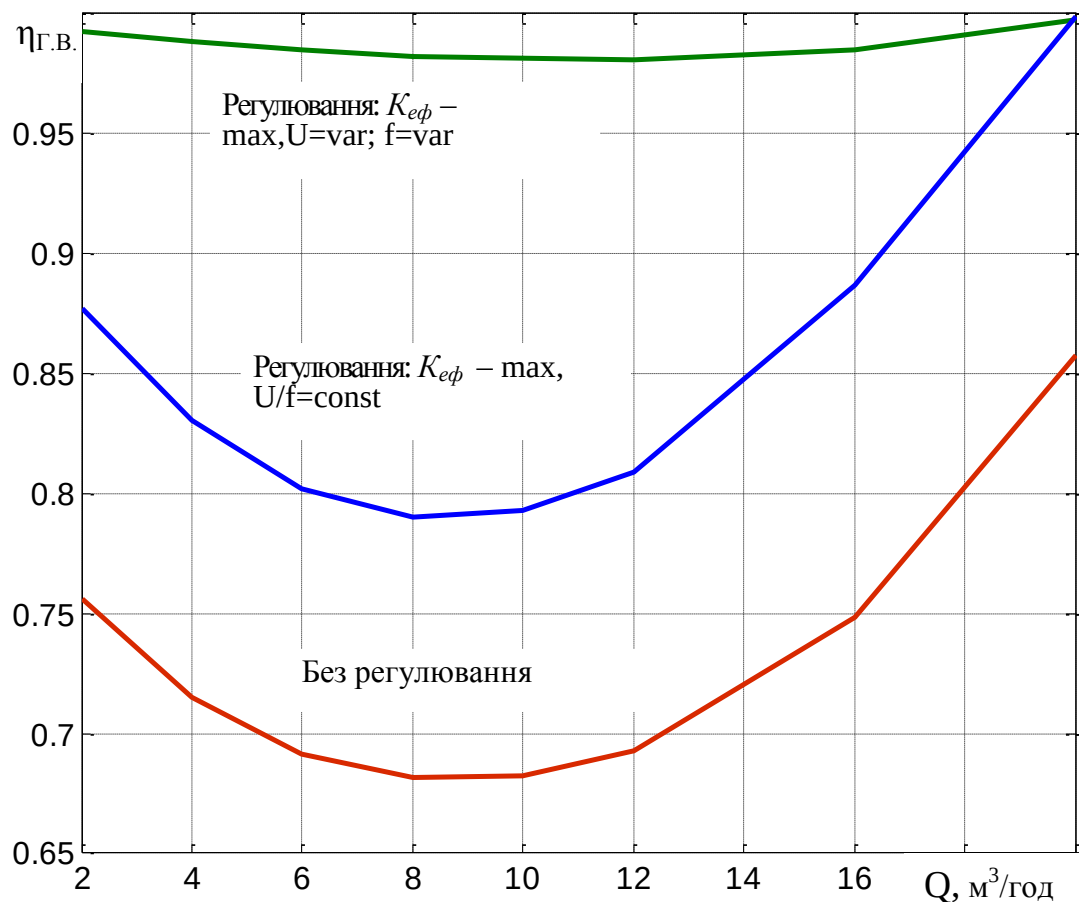


Рис. 7.2 Залежності ККД гідравлічних вентилів від подачі за різними законами регулювання

інтегральні добові ККД насосної ЕМС (7.3); ступінь зміни витрат ΔW завдяки регулюванню, річна економія коштів ΔE_p на оплату електроенергії.

Таким чином, в результаті чисельних експериментів досліджено вплив законів регулювання продуктивності електромеханічної системи водопостачання на ефективність використання електричної енергії та виконано порівняльний аналіз доцільності застосування різних способів оцінки енергоефективності ЕМС.

Таблиця 7.1

Результати порівняльних досліджень енерговитрат системи водопостачання для режимів асинхронного приводу за різними законами регулювання

Режим	W_{10} , кВт·год	W_p , кВт·год	ΔW , %	η_{EMCp}	ΔE_p , грн
Без регулювання	46,25	16881,25	–	0.1632	–
Регулювання: $K_{ef} - \max$; $U = \text{var}; f = \text{var}$	35,68	13023,2	22,85	0.2116	3858,05
Регулювання: $K_{ef} - \max$; $U / f = \text{const}$	38,558	14073,67	16,63	0.1958	3562,4
Регулювання: $K_{ef} - \max$; $H_{\min} - \max$;	44,3	16169,5	4,22	0.1704	711,75
Регулювання: $\eta_{agr} - \max$;	39,66	14475,9	14,25	0.1904	2405,35

Це дозволило обрати критерій комплексної оцінки енергоефективності ЕМС НУ та визначити за його допомогою оптимальні режими роботи ЕМПЕ за зміни частоти і напруги живлення у складі насосної установки багатоповерхового будинку з урахуванням змінного навантаження, які забезпечують зниження витрат енергії на водопостачання до 23%.

7.1.3 Підвищення енергоефективності системи водопостачання багатоповерхового будинку на основі використання ВІД

Вентильно-індукторні двигуни ефективні для використання у складі насосних агрегатів [133, 145, 174, 181]. Для дослідження та аналізу режимів роботи електромеханічної системи холодного водопостачання багатоповерхового будинку з ВІД розроблено відповідну комплексну математичну модель [29], спираючись на [27], що зображена на рис. 7.3. Вона складається з електричної, механічної і гідравлічної частин. Електрична частина включає стандартні блоки живлення (представлено напругою постійного струму), двигуна SRM, комутатора за схемою

асиметричного моста, гістерезисного регулятора. Основні та геометричні розміри статора і ротора ВІД відповідають двигуну потужністю 3 кВт, що досліджено у розділі 5.

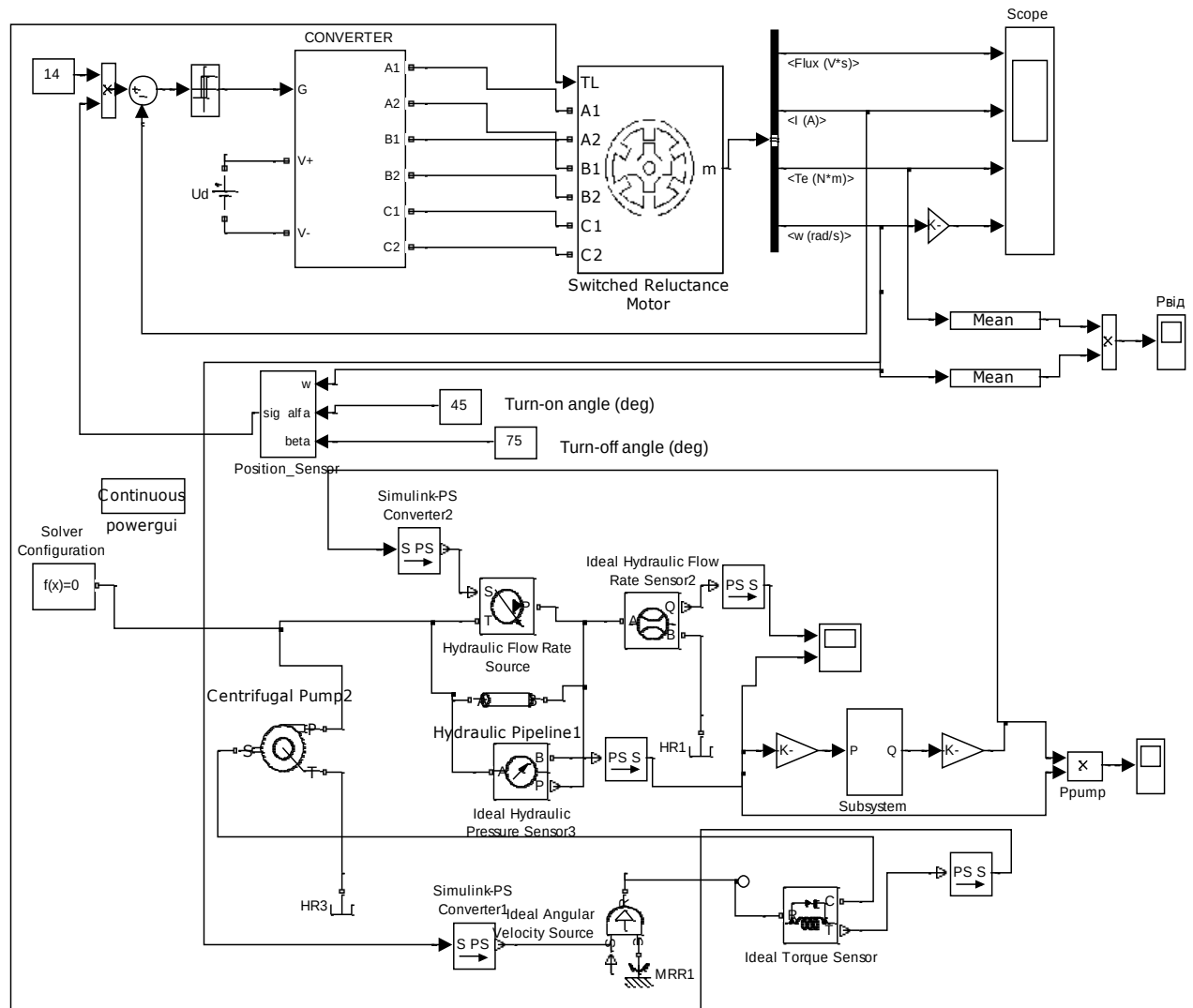


Рис. 7.3 Імітаційна модель електромеханічної системи холодного водопостачання багатоповерхового будинку з ВІД

Гідравлічна частина (рис. 7.1) представлена стандартними блоками пакету розширення Simscape бібліотеки Simulink: відцентрового насосу Centrifugal Pump, трубопроводу Hydraulic Pipeline, регулятора потоку води Hydraulic Flow Rate та підсистемою Subsystem, що розраховує мінімальний напір (або мінімальний тиск в системі) за конкретної витрати згідно добовому графіку водопостачання з

врахуванням гідравлічних опорів мережі багатоповерхового будинку за виразом (2.33).

Блок Hydraulic Pipeline враховує втрати на тертя та явище стискання рідини, нехтуючи інерцією рідини, ефектом гідравлічного удару та зміною тиску, що спричинений прискоренням рідини. Робочі характеристики відцентрового насосу К 20/30 задаються у вигляді поліномів, виходячи з наявності індивідуальних характеристик насосу для декількох частот обертання робочого колеса: $P - Q - P_2$ і $n - Q - P_2$, де P - тиск, Q - подача, P_2, n - потужність і частота обертання на валу. Мінімальний необхідний тиск насоса розраховується в залежності від подачі для конкретної характеристики магістралі за виразом (2.38). Навантаження насоса представлено у вигляді добового графіку водопостачання багатоповерхового будинку (рис. 2.4).

Імітаційна модель дозволяє досліджувати електромеханічні і гідравлічні процеси та відповідні їм часові залежності частоти обертання, струмів і моменту двигунів, тиску і продуктивності ЕМС насосу, визначати параметри системи електродвигун – насос – навантаження для регулювання продуктивністю насоса згідно добового графіку водопостачання багатоповерхового будинку, розраховувати коефіцієнти корисної дії насосу, ВІД і насосного агрегату та коефіцієнт енергетичної ефективності ЕМС за формулами (7.1) – (7.3).

З метою визначення алгоритму регулювання частоти обертання ВІД за зміни подачі згідно добового графіку водопостачання проведено дослідження квазісталих режимів роботи насосного агрегату. За результатами чисельних досліджень визначено напругу ланки постійного струму й кути вмикання при постійній зоні комутації [29], які забезпечують діапазон зміни продуктивності насоса згідно добового графіку водопостачання багатоповерхового будинку (рис.2.4).

Аналіз квазісталих режимів здійснено із визначенням усталеного режиму (при закінченні перехідного процесу) за усталеними показниками частоти обертання двигуна, тиску та продуктивності. ККД двигуна у даних режимах розраховано як відношення корисної потужності ВІД $P_{2ВД}$ у сталому режимі до потужності P_1 , що

визначається як сума корисної потужності, втрат в обмотці статора, магнітних і механічних втрат.

Для діапазону роботи відцентрового насоса визначено незначну ступінь пульсацій частоти обертання ротора ВІД (до 3%). Ступінь пульсацій електромагнітного моменту двигуна не перевищує 44%. За результатами досліджень встановлено, що ВІД забезпечує необхідні значення продуктивності за алгоритмом відповідних значень напруги ланки постійного струму і кутів вмикання (при $\theta_k = 30^\circ - const$): номінальну продуктивність ($Q_n = 19,6 \text{ м}^3 / \text{год}$) – при $U_d = 250 \text{ В}$ і $\theta_{\text{вм}} = 45^\circ$, менших за номінальну (16; 13,9; 8,3; 2 ($\text{м}^3 / \text{год}$)) – напругою $U_d = 200 \text{ В}$ і кутами $\theta_{\text{вм}} = 42, 45, 48$ і 50 град відповідно.

Результати порівняльних чисельних досліджень електромеханічних процесів системи водопостачання насосного обладнання на основі АД і ВІД багатоповерхового будинку спираючись на одні й теж критерії оцінки енергоефективності показали: ККД АД змінюється у діапазоні 67,7...82,3% для діапазону зміни частоти обертання АД з 252,9 рад/с в до 310,1 рад/с; ККД ВІД змінюється в межах 83,5%...86% для діапазону зміни частоти обертання ВІД з 287 рад/с до 316 рад/с; використання ВІД для регулювання продуктивності насосного агрегату, зокрема системи водопостачання багатоповерхового будинку, забезпечує підвищення надійності (за відсутності помпажу) та ефективності (завдяки високому значенню ККД двигуна) електромеханічної системи у цілому.

7.1.2 Підвищення енергоефективності моноблочного насосу на основі конденсаторного асинхронного двигуна у квазісталих режимах

Розглянуто можливість формування заходів підвищення енергоефективності електромеханічної системи моноблочного насосу, який призначено для роботи в умовах невеликих статичних напорів у робочих режимах [156]. Насос БЦ1,1-20-У1 оснащено конденсаторним асинхронним двополюсним двигуном потужністю 550 Вт, на валу якого розміщено робоче колесо відцентрового насосу. Особливості робочих режимів АД у складі насосу обумовлені: зміною ступеня еліптичності поля

статора із зміною ковзання; наявністю третьої просторової гармоніки статора; підвищеним опором обмотки ротора для забезпечення потрібних пускових властивостей АД.

Для дослідження квазісталих режимів застосовано імітаційну модель електромеханічної системи насоса [27], що наведено у розділі 2, а також структурну математичну модель асинхронного двигуна із інтеграцією її до імітаційної моделі ЕМС, яка враховує при розрахунках режимів роботи нелінійні залежності параметрів заступної схеми, спектр просторових гармонік магнітного поля, складну структуру обмотки статора (розподіл провідників обмотки по пазах, підключення до однофазній мережі) [155]. Коефіцієнт корисної дії у квазісталих режимах при еліптичності поля розраховано за виразом

$$\eta = \frac{\int_0^T \omega_r \left(M_e - M_\partial - 3.75 \cdot 10^{-4} G_r - \frac{P_{VH}}{\omega_{rH}} \left(\frac{\omega_r}{\omega_{rH}} \right)^2 \right) dt}{\int_0^T u i_M dt}. \quad (7.5)$$

Пошук співвідношення величин конструктивних параметрів АД для забезпечення максимальної енергоефективності здійснюється у процесі чисельного дослідження показників квазісталих режимів. Найбільш проста технічна реалізація зміни величини конструктивних параметрів має місце при варіюванні кількістю витків фаз і ємністю робочого конденсатора. Доцільно дослідити переваги використання синусної обмотки статора асинхронних двигунів, які працюють зі змінним навантаженням у складі ЕМС.

Розрахунки здійснено для двох варіантів [156]: з урахуванням тільки основної гармоніки МРС і з урахуванням гармонік з номерами 1, 3, 5, 7. Задано момент навантаження на валу – 1,967 Н·м та ємність робочого конденсатора – $C_p = 16$ мкФ. Параметри заступної схеми визначено у відповідності з [166] для номінального режиму роботи. Для врахування нелінійності параметрів за основним полем враховано залежності зміни коефіцієнтів насичення у функції МРС, які розраховано відповідно до [166]. Результати розрахунків показників робочих режимів зведено до

табл. М.1 (Додаток М). В цій таблиці також наведено конструктивні параметри трьох варіантів схем обмотки статора. Чисельні дослідження квазісталих режимів конденсаторного АД з серійною обмоткою насосу БЦ1,1-20-У1 показали зменшення ККД (на 1,85%) при врахуванні просторових гармонік ($\nu = 1, 3, 5, 7$) і можливість його незначного збільшення (на 0,3 %) при варіюванні кількістю витків робочої і допоміжної обмоток.

Дослідження показали, що використання синусних обмоток (завдяки забезпеченню синусоїдального розподілу магніторушійної сили) дозволяє підвищити ефективність однофазних двигунів у несиметричних сталих і квазісталих режимах у складі насосів і одноциліндрових поршневих компресорів (див. п. 4.6, Розділ 4).

7.2 Підвищення ефективності роботи свердловинного штангового насоса з верстат-гойдалкою

Для приводу свердловинних штангових насосів запропоновано технічне рішення [24, 25], що стосується використання замість асинхронного двигуна вентильно-індукторного, частота обертання ротора якого змінюється системою керування в залежності від показів датчиків контролю за дебітом свердловини, що дозволить підвищити енергоефективність роботи верстат-гойдалки та електромеханічної системи у цілому. Це можна реалізувати завдяки зменшенню енерговитрат процесу видобутку нафти шляхом використання енергоефективного регульованого ВІД з підвищеним ККД та датчиків дебіту свердловини, від яких поступають сигнали на пристрій керування, що забезпечує регулювання частоти обертання ротора ВІД.

Верстат-гойдалка (рис. 7.4) містить головку балансира 1, стійку 2, балансир 3, кривошип 4, противагу 5, гирловий шток 6, шатун 7, вентильно-індукторний двигун 8 з редуктором 9, який керується системою керування 10, в залежності від показників датчиків рівня 11, які відслідковують кількість перекачаної нафти за

один період по експлуатаційній колоні 12 за допомогою насосно-компресорної труби 13.

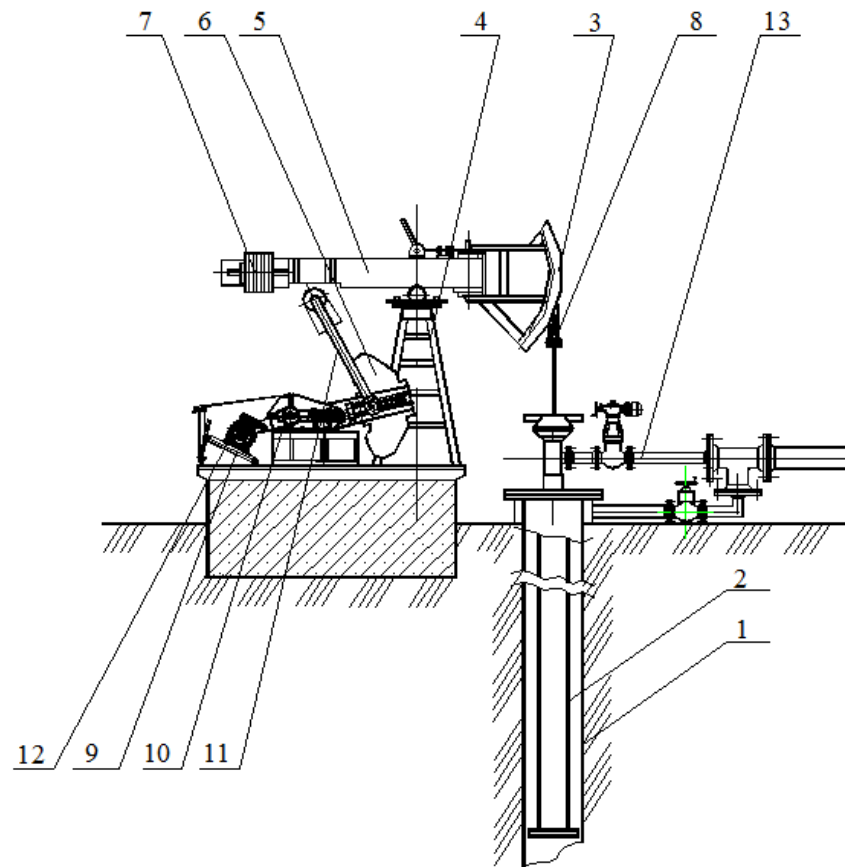


Рис. 7.4 Верстат-гойдалка

Верстат-гойдалка працює таким чином. Вентильно-індукторний двигун приводить в рух кривошипно-шатунний механізм, який призводить до поступального руху насосно-компресорної труби. Датчики фіксують кількість видобутої нафти та передають сигнал до пристрою керування, який реалізує відповідне рішення для регулювання частоти обертання ВІД.

7.2.1 Обґрунтування можливості регулювання частоти обертання ВІД і стабілізації частоти обертання кривошипа верстата-гойдалки

З метою обґрунтування використання вентильно-індукторного приводу для верстат-гойдалки проведено дослідження його робочих режимів (регулювання і стабілізації частоти обертання ротора ВІД, визначення діапазону зміни ККД з урахуванням навантаження) на основі математичного моделювання. Проведено

моменту $M_{крн}=18,4 \text{ кН} \cdot \text{м}$ та його зменшених значень ($M_{кр1} = 0,8 M_{крн}$; $M_{кр2} = 0,7 M_{крн}$; $M_{кр3} = 0,45 M_{крн}$).

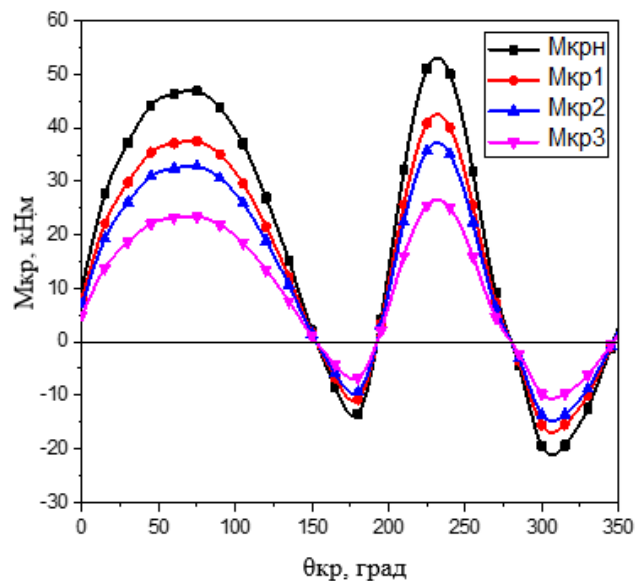


Рис. 7.6 Залежності моментів навантаження верстат-гойдалки від кута повороту кривошипа

7.2.2 Дослідження впливу кутів комутації на частоту обертання вентиляно-індукторного двигуна і кривошипа та ККД

Досліджено трифазний ВІД базової конфігурації 6/4 потужністю 60 кВт, номінальною напругою живлення $U = 380 \text{ В}$ для верстат-гойдалки, в якій $M_{крн} = 18,4 \text{ кН} \cdot \text{м}$, момент інерції приводу $J = 1 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2$, передаточне число редуктора $k_{ред} = 200$ [123]. Досліджено вплив кутів вмикання (за зміни у діапазоні $42^\circ \dots 52^\circ$) при постійній зоні комутації ($\theta_k = 30^\circ$) на частоту обертання двигуна і кривошипу та ККД. За результатами досліджень (табл. 7.2) визначено кути комутації ($\theta_{вм} = 47$ град і $\theta_{вм} = 77$ град), які забезпечують роботу двигуна з високим значенням ККД (93,1%), і при цьому його частота обертання не перевищує допустиму верхню межу частоти кривошипа верстата-гойдалки 15 об/хв.

Розраховано залежність частоти обертання (рис. 7.7) та залежність ККД двигуна від моменту навантаження (рис. 7.8). Отримані дані свідчать про можливість регулювання частоти обертання двигуна в діапазоні 150...300 рад/с.

Таблиця 7.2

Показники ВІД верстат-гойдалки при зміні кутів комутації

$\theta_{\text{вм}}, \text{град}$	$\theta_{\text{вим}}, \text{град}$	$\omega_r, \text{рад/с}$	$n_{\text{кр}}, \text{об/хв.}$	$P_1, \text{кВт}$	$P_2, \text{кВт}$	$\eta, \text{в.о.}$
42	72	344	16,5	36,7	34	0,927
45	75	343	16,4	36,2	33,9	0,936
46	76	320	15,5	34,2	31,6	0,933
47	77	302	14,4	31,9	29,6	0,931
48	78	279	13,5	29,5	27,3	0,924
50	80	222	10,6	23,7	21,4	0,904
52	82	156	7,5	17,3	14,9	0,860

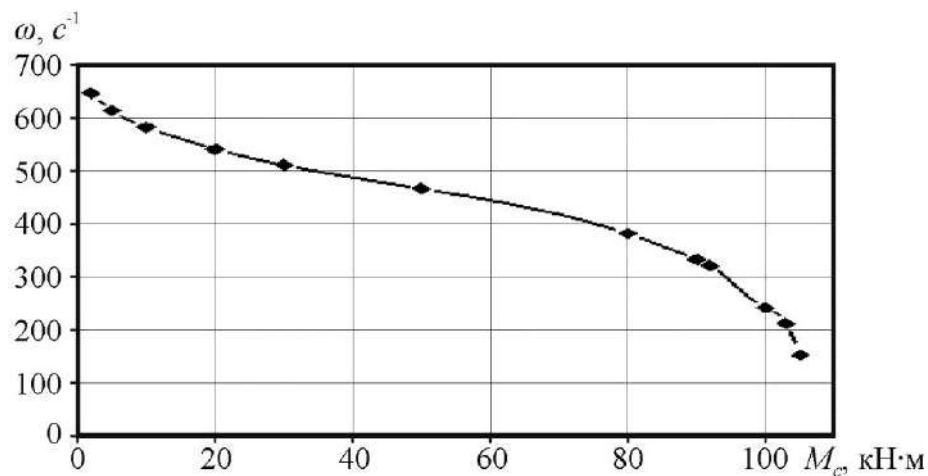


Рис. 7.7 Залежність частоти обертання ротора від моменту навантаження

Регулювання частоти обертання ВІД в цьому діапазоні дозволяє отримати ККД на рівні 86...93%, що задовольняє технічним умовам.

7.2.3 Дослідження можливості стабілізації частоти обертання ВІД і кривошипа верстат-гойдалки

Досліджено вплив моменту навантаження верстат-гойдалки на частоту обертання кривошипа ($U = 400$ В, $\theta_{\text{см}} = 47$ град і $\theta_{\text{вим}} = 77$ град) та її стабілізації при зміні напруги живлення (табл. 7.3).

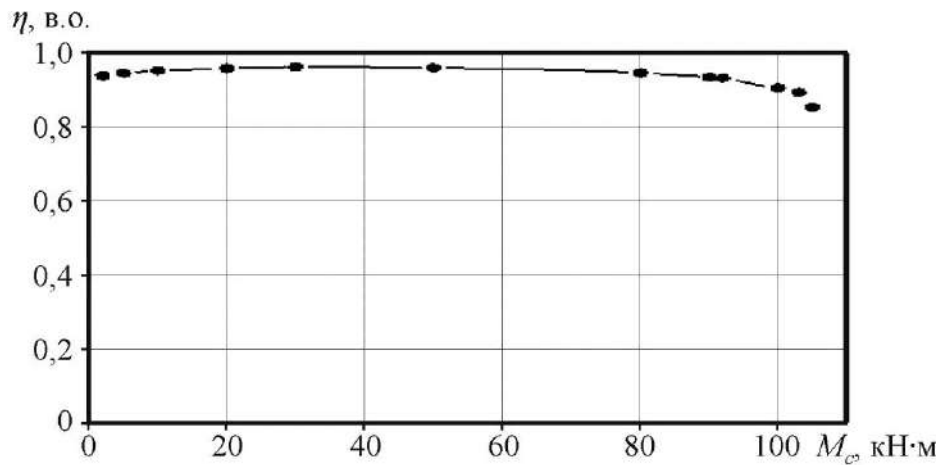


Рис. 7.8 Залежність ККД від моменту навантаження

Таблиця 7.3

Вплив моменту навантаження верстат-гойдалки на частоту обертання кривошипу та її стабілізація при зміні напруги живлення

$M_{\text{кр}}, \text{кН} \cdot \text{м},$	Напруга живлення			
	$U = \text{const}$		$U = \text{var}$	
	$U, \text{В}$	$n_{\text{кр}}, \text{об/хв.}$	$U, \text{В}$	$n_{\text{кр}}, \text{об/хв.}$
$M_{\text{крн}}$	400	15,46	360	14
$M_{\text{кр1}}$		19,25	320	15,65
$M_{\text{кр2}}$		20,7	300	15,6
$M_{\text{кр3}}$		22,5	270	15,5

Результати розрахунків показали, що стабілізація частоти коливань кривошипа на рівні 15 об/хв. при зміні навантаження в діапазоні $(1 \dots 0,45)M_{\text{крн}}$ досягається регулюванням напруги живлення у діапазоні 360...270 В.

Запропоновано спосіб стабілізації частоти обертання ротора ВІД [122], що полягає у формуванні струмів у фазній обмотці при здійсненні комутації шляхом подачі напруги на фазу двигуна із затримкою, величина якої прямо пропорційна до змін частоти обертання ротора, викликаних зміною моменту опору двигуна. Датчик положення ротора наперед виставляють з максимально можливим випередженням формування сигналу подачі напруги на фазу двигуна, забезпечуючи максимально

можливу частоту обертання. Цей спосіб забезпечує автоматичну стабілізацію частоти обертання валу ВІД у певних межах без введення допоміжних сигналів та вимірювання значень попередніх періодів сигналу датчика положення ротора та підвищення надійності електроприводів на базі вентильно-індукторних двигунів.

7.2.4 Розроблення вентильно-індукторного двигуна підвищеної ефективності для приводу свердловинного штангового насосного агрегату

Розробка вентильно-індукторного двигуна та його дослідження проведені для приводу свердловинного штангового насосного агрегату із забезпеченням параметрів: частота обертання 1500 об/хв, потужність – у діапазоні від 30 до 55 кВт, довжина статора і ротора ($l_\delta = 290$ мм), зовнішній діаметр статора ($D_a = 300$ мм).

На першому етапі попереднього проектування вентильно-індукторного двигуна визначено геометричні розміри статора і ротора та виконано розрахунок його параметрів. Для цього використано методику ескізного проектування [196], що базується на спрощеному розрахунку перехідного процесу ВІД на циклі комутації фази. Прийнято наступні припущення: взаємний вплив фаз не враховується; комутація вважається миттєвою, включення фази відбувається в момент неузгодженого положення зубців статора і ротора; насичення сталі не враховується, магнітна проникність нескінченно велика; приймається наближена кусково-лінійна апроксимація кривої магнітної провідності повітряного зазору; втрати магнітопроводу враховуються наближено.

Вибір геометрії ВІД проводився шляхом зміни його геометричних параметрів з обмеженням по діаметру статора. Критерієм оцінки проектування ВІД для даного об'єкту обрано ККД (не менше 90 % і більше в порівнянні з АД такої ж потужності). При розробці магнітної системи ВІД обрано: базову конфігурацію 6/4 (співвідношення числа зубців статора і ротора) із метою спрощення схеми комутатора; мінімально можливий повітряний зазор з метою зниження втрат в сталі; висоту зубців та ярем ротора і статора за рекомендаціями; значення густини струму за обмеженням максимально можливого перерізу котушки і тепловими втратами;

число витків та довжину магнітопроводів на задану потужність двигуна за умови, що індукція збудженого зубця знаходиться в діапазоні 1,6...1,7 Тл.

На основі методики ескізного проектування [196] розроблено ВІД потужністю 32 кВт (напруга живлення 380 В, частота обертання 1500 об/хв, ККД 90,6 %, $\theta_{вм}=45$ град і $\theta_{вим}=75$ град, густина струму $j_k=6$ А/мм²), геометричні розміри якого представлено на рис. 2.2 [124].

На другому етапі за допомогою комплексної математичної моделі ВІД зі схемою асиметричного моста (рис. 2.1) проведено дослідження впливу кутів вмикання і вимикання, числа витків обмотки фази статора і довжини магнітопроводу на електромагнітні і механічні характеристики ВІД (геометричні параметри якого відповідають даним табл. 2.1), на ККД з врахуванням втрат в міді, магнітних та механічних втрат з метою підвищення ефективності електромеханічного перетворення енергії ВІД. З'ясовано, що зміна напруги живлення та кутів комутації суттєво впливає на потужність і ККД двигуна. За незмінної частоти обертання зниження кутів комутації призводить до підвищення потужності ВІД і навпаки, що також відображається на ККД.

Визначено оптимальні значення кутів вмикання і вимикання ($\theta_{вм}=36$ град і $\theta_{вим}=66$ град), що забезпечують ККД у діапазоні 94,4...94,55 % при зміні корисної потужності від 54 до 27 кВт для частот обертання 1500...3000 об/хв. (рис. 7.9).

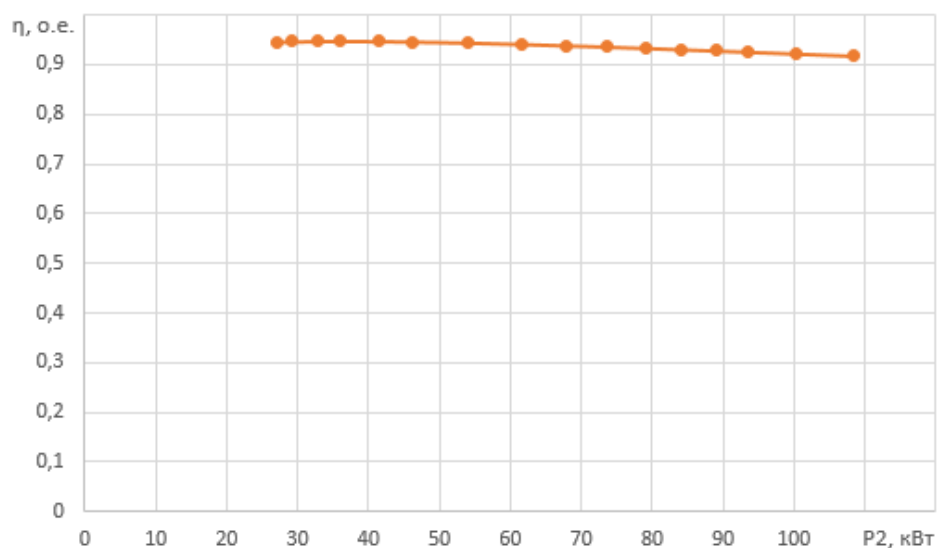


Рис. 7.9 Залежність коефіцієнту корисної дії від корисної потужності

Це дозволяє здійснювати регулювання частоти обертання зі збереженням високої енергоефективності приводу верстата-гойдалки при зміні навантаження. Механічна характеристика розробленого ВІД з $\theta_{\text{вм}}=36$ град і $\theta_{\text{вим}}=66$ град – на рис.7.10.

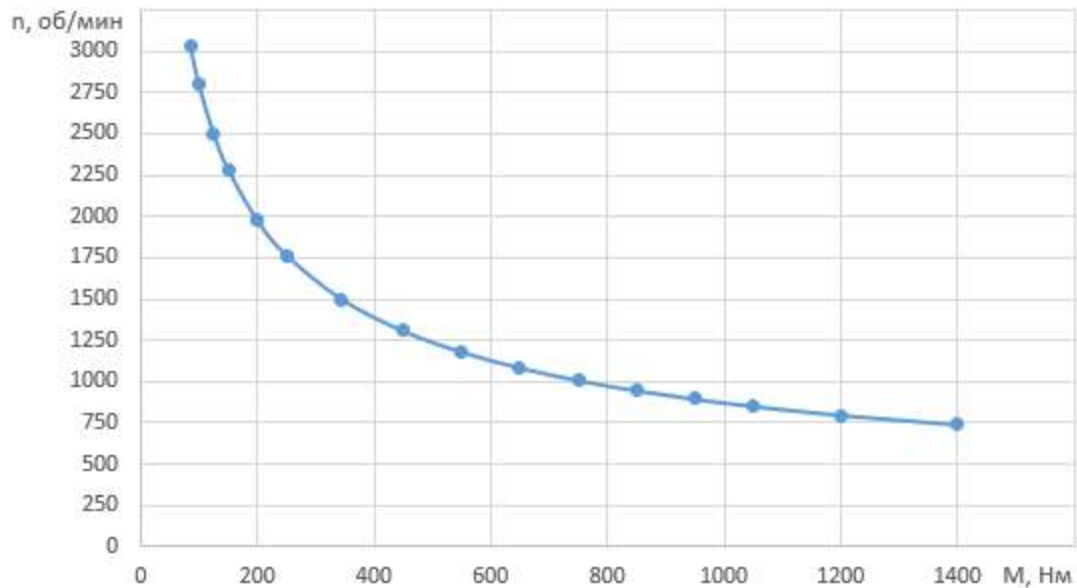


Рис. 7.10 Механічна характеристика ВІД, ($\theta_{\text{вм}}=36$ град і $\theta_{\text{вим}}=66$ град)

Досліджено вплив числа витків обмотки фази статора і довжини магнітопроводу на енергетичні показники ВІД. Вибір кількості витків обмотки статора обґрунтовано необхідністю забезпечення високого рівня ККД двигуна, оскільки максимальне його значення відповідає певному діапазону числа витків. При варіюванні числом витків обмотки фази статора (у котушці) від 20 до 100 визначено раціональні їх значення, що знаходяться у межах 26...42, ККД при цьому знаходиться в діапазоні 94,2...94,4 %. Показано, що незалежно від числа витків обмотки фази зміна довжини магнітопроводу ВІД не суттєво впливає на його ККД. Так при зміні довжини статора і ротора від 150 мм до 500 мм ККД двигуна практично незмінний (93,29...94,73 %). В результаті досліджень спроектовано ВІД потужністю 54 кВт на номінальну частоту обертання 1500 об/хв з числом витків обмотки статора $W_k=32$, і довжиною $l_\delta=290$ мм і кутами комутації $\theta_{\text{вм}}=36$ град і $\theta_{\text{вим}}=66$ град, що забезпечує ККД на рівні 94,4 % (табл. 7.4). На третьому етапі досліджено квазісталі режими, отримано часові залежності частоти обертання ВІД для середніх значень частот обертання двигуна (для нижчої, середньої та вищої): 3000, 1500 і 750 об/хв. Визначено незначні пульсації частоти

Таблиця 7.4

Геометричні параметри та основні показники ВІД

Показники ВІД			
геометричні параметри		основні показники	
D_a , мм	300	P_2 , ВТ	54
D_i , мм	176,44	$n_{ном}$, об/хв	1500
d_6 , мм	70	η , %,	94,4
l_δ , мм	290	j_k , А/мм ²	5,9
δ , мм	0,3	$P_{ел}$, кВт	1,28
W_k	32	$P_{ст}$, кВт	1,87
b_{zs} , мм	41,19	$P_{мех}$, кВт	0,23
b_{zR} , мм	45,51	I_d , А	152,86
h_{zs} , мм	20,59	I_ϕ , А	66,59
h_{zR} , мм	22,8	m_s , кг	83,43
h_{as} , мм	41,19	m_R , кг	29,46
h_{aR} , мм	30,12	m_m , кг	15,68
d_{np} , мм	3,81	m , кг	128,57
β_s , град	27		
β_R , град	30		

обертання ротора (до 3 %) для 3000 і 1500 об/хв) та їх збільшення до 46 % для нижчої частоти обертання 750 об/хв. Аналіз масо-габаритних та технічних характеристик розробленого ВІД показав, що значення його ККД на 1,4...7,5 % більше і загальна маса у 2 рази менше, ніж у двошвидкісного асинхронного двигуна 4A250S4/2Y3 (табл. 7.5).

Таблиця 7.5

Масо-габаритні та технічні показники ВІД

Масо-габаритні та технічні показники	Двигуни насосів та верстатів – гойдалок	
	4A250S4/2Y3	ВІД
D_a / D_i мм	437/ 289,9	300/176,4
l_δ , мм	264	290
P , кВт	50/60	54...27
U , В	$\approx 380/660$	≈ 380
n , об/хв	1500/3000	1500...3000
M , Нм	318 /190	344...85,9
η , %	93/87	94,4...94,5
m , кг	485	241,3
j_k , А/мм ²	3,5/3,4	5,9/2,8

7.4 Підвищення енергоефективності робочих режимів ВІД герметичних поршневих компресорів

Важливим кроком до підвищення надійності приводу поршневих герметичних компресорів є зниження пульсацій частоти обертання ротора до регламентованого їх рівня при регулюванні частоти обертання зміною напруги в необхідному діапазоні (1:4...1:4,5), особливо за низьких напругах.

Завдяки меншим значенням моментів інерції ротора ВІД, ніж з АД, питання зниження пульсацій частоти обертання ВІД є актуальним. Воно може вирішуватися або традиційним способом (шляхом використання маховика, вага якого з ВІД може бути меншою у два рази в порівнянні з АД), або за допомогою регулювання частоти обертання ротора ВІД з цією метою досліджено вплив моменту інерції приводів на основі АД і ВІД з навантаженням, характерним для одноциліндрових поршневих компресорів, (табл. 7.6) на ККД і пульсації частоти обертання ротора двигунів у номінальному режимі. Враховано втрати електричні, магнітні, механічні та додаткові. Аналіз результатів показав, що ККД у робочих режимах вентильно-індукторного двигуна ГПК більший на 4...5% в порівнянні з АД. В номінальному режимі пульсації частоти обертання ротора двигунів не перебільшують допустимий їх рівень для ГПК (20 %).

Таблиця 7.6

Вплив моменту інерції привода одноциліндрового компресора з АД і ВІД на ККД і пульсації частоти обертання у квазісталіх режимах

Тип ЕМП	M_c Н·м	J $кг \cdot м^2$	U , В	I_ϕ , А	Σp , Вт	P_2 , Вт	η , %	ω_{rcp} , рад/с	$\delta\omega_r$ %
АД	0,345	$1,44 \cdot 10^{-4}$	220	0,65	61,13	101,4	61,63	294,7	11,6
	0,344	$7,2 \cdot 10^{-4}$	220	0,645	63,13	101,27	59,23	295	2,37
ВІД	0,33	10^{-4}	215,8	0,915 0,479	55,04	104,36	65,46	314	12,25
	0,33	$5 \cdot 10^{-4}$	216,3	0,914 0,478	55,32	104,35	65,35	314	2,5

Посилання [24, 25, 27, 29, 123, 124, 133, 145, 153, 155, 156, 166, 204] див. список використаних джерел стор. 275 – 299.

7.5 Висновки до розділу 7

1. Науково обгрунтовано оптимальні режими роботи АД при регулюванні частоти і напруги живлення з врахуванням особливості навантаження насосної установки багатоповерхового будинку шляхом чисельних досліджень за допомогою розробленої комплексної математичної моделі з використанням критерію комплексної оцінки енергоефективності системи, який враховує гідравлічні її опори і необхідний мінімальний напір в залежності від витрат згідно добового графіку водопостачання. Це дозволяє підвищити енергоефективність асинхронних двигунів і ЕМС водопостачання до 23 % в порівнянні з нерегульованим АД.

2. Обгрунтовано ефективність застосування у складі насосів і поршневих компресорів однофазних АД з короткозамкненим ротором і синусими обмотками статора, просторові гармоніки яких незначно (0,2%) впливають на ККД двигунів у номінальних робочих режимах, та рекомендовано оптимізувати серійні обмотки шляхом варіювання кількістю витків фаз. Доцільність заходів підтверджена шляхом оцінки енергоефективності робочих режимів з використанням ККД з врахуванням еліптичності поля на прикладі математичного моделювання двофазного двополюсного конденсаторного АД потужністю 550 Вт моноблочного насосу БЦ1,1-20-У1, що враховує нелінійні залежності параметрів заступної схеми двигуна, спектр просторових гармонік магнітного поля, структуру обмотки статора.

3. Запропоновано нові технічні рішення: енергоефективний вентильно-індукторний електропривод верстата-гойдалки (Пат. на корисну модель 98824, Україна); спосіб стабілізації частоти обертання вентильно-індукторного двигуна (Пат. на корисну модель № 107247, Україна.).

4. Науково обгрунтовано принципи керування частотою обертання вентильно-індукторних двигунів насосів, компресорів і верстат-гойдалок та її стабілізації шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації, що дозволяє формувати

енергоефективні робочі режими ВІД для періодичних моментів опору.

5. Науково обгрунтовано ефективність застосування ВІД для механізмів зі змінним навантаженням: насосних установок багатоповерхових будинків завдяки відсутності нестійких режимів, що обумовлено їх м'якою механічною характеристикою; насосів і поршневих компресорів завдяки підвищенню ККД в робочих режимах до 6% в порівнянні з АД; верстат-гойдалок із забезпеченням регулювання і стабілізації частоти обертання кривошипа на рівні 15 об/хв згідно технологічних вимог шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації, а також зменшення загальної маси сталі та міді в порівнянні з АД.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна проблема розвитку теорії електричних машин в напрямку розроблення математичних моделей, концепцій оптимального проектування, принципів керування частотою обертання та уточнення електромеханічних процесів, формування робочих характеристик вентильно-індукторних і асинхронних двигунів, спрямованих на підвищення їх енергоефективності при роботі в умовах змінного навантаження із забезпеченням технічних і технологічних вимог.

Основні наукові та практичні результати роботи.

1. В результаті аналізу наукових публікацій щодо сучасних підходів розроблення електромеханічних перетворювачів енергії для електромеханічних систем зі змінним навантаженням, особливостей режимів роботи і перспектив розвитку електричних машин для цих умов обґрунтована актуальність напрямку досліджень, який полягає у подальшому розвитку теоретичних засад створення енергоефективних вентильно-індукторних і асинхронних двигунів з врахуванням особливостей навантаження.

2. Розроблено загальну структуру математичної моделі для дослідження квазісталих режимів електромеханічних перетворювачів енергії, як складових електромеханічних систем зі змінним навантаженням, яка включає удосконалені динамічні математичні моделі асинхронних і вентильно-індукторних двигунів, навантаження і забезпечує відповідно розробленому алгоритму розрахунок інтегральних значень струмів, моментів, частоти обертання ротора та їх пульсацій, втрат, коефіцієнтів корисної дії на періоді повторення, аналіз квазісталих режимів і порівняння розрахунку квазісталих режимів з результатами розрахунків усталених режимів зі сталим моментом опору, який дорівнює середньому значенню періодичного навантаження.

3. Удосконалено динамічні математичні моделі для дослідження квазісталих режимів трифазних і двофазних з фазозсуваючими елементами у колі статора

асинхронних двигунів, які враховують несиметрію, періодичний характер навантаження та забезпечують розрахунок інтегральних значень показників двигунів на періоді повторення, що дозволяє уточнювати закономірності протікання електромагнітних і електромеханічних процесів в АД за зміни їх конструктивних параметрів, моментів опору та інерції.

4. Вперше розроблено комплексну математичну модель для дослідження динамічних режимів частотно-регульованих АД приводів поршневих компресорів з врахуванням періодичного навантаження, нелінійності електромагнітних параметрів, несиметрії та несинусоїдності процесів, що дозволяє проводити аналіз режимів їх роботи за зміни частоти і напруги живлення.

5. Співставлення результатів досліджень режимів роботи АД одноциліндрового поршневого компресора з періодичним і постійним моментом опору дозволило виявити розбіжності в розрахунках показників квазісталіх режимів, наприклад пульсацій кутової частоти обертання ротора $\delta\omega_r$ і коефіцієнта корисної дії $\Delta\eta$: для трифазного шестиполюсного АД потужністю 700 Вт з моментом інерції $J = 0,0046 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – $\delta\omega_r = 81,5\%$, $\Delta\eta = 27\%$; для однофазного АД з двофазними обмотками потужністю 30 Вт з $J = 0,00003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – $\delta\omega_r = 134\%$ і $\Delta\eta = 9,6\%$. Найменші значення цих розбіжностей (11% і 0,6%) та (14% і 2%) характерні відповідно для двополюсного однофазного (100 Вт, $J = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) і шестиполюсного трифазного (11 кВт, $J = 0,18 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$) АД.

6. З метою селекції нерегульованих АД, для яких комплексне проектування з урахуванням особливостей навантаження є доцільним для підвищення енергоефективності режимів роботи, запропоновано критерій оцінки інтенсивних квазісталіх режимів, який розраховується як відношення механічної сталої двигунів до електромагнітної та залежить від числа пар полюсів, критичного моменту АД і ковзання, моменту інерції привода й визначає ефективність квазісталіх режимів в залежності від співвідношення цих сталих часу. Проведено аналіз та обрано серійні АД у діапазоні потужностей 60 Вт... 11 кВт, що потребують модернізації для роботи в умовах змінного навантаження.

Вперше науково обґрунтовано за допомогою критерію інтенсивних квазісталих режимів доцільність розробки додаткових рекомендацій з підвищення ефективності робочих режимів нерегульованих трифазних і частото-регульованих асинхронних двигунів поршневих одноциліндрових компресорів та виявлено області критичного зниження енергетичної ефективності із падінням коефіцієнта корисної дії більш ніж на 10%.

7. Розвинуто концепцію оптимального проектування асинхронних двигунів з врахуванням перехідних процесів за умови змінного навантаження, яка базується на отриманих аналітичних залежностях коефіцієнта корисної дії у квазісталих режимах від конструктивних параметрів, та дозволяє визначити резерв підвищення ККД у порівнянні з оптимальним проектуванням двигунів у сталих режимах. Обґрунтовано можливість підвищення ККД у квазісталих режимах до 10 % на прикладі трифазного двигуна 4A80A6Y3 з пульсуючим навантаженням за допомогою побудованих вперше аналітичних залежностей ККД від довжини пакета і числа ефективних провідників обмотки статора при їх варіюванні у діапазоні ± 10 та до 5% – для асинхронних конденсаторних двигунів одноциліндрових компресорів при варіюванні ємністю робочого конденсатора і моментом інерції у діапазоні $\pm 20\%$ від значень, що відповідають обраним базовим двигунам відповідно.

8. Розвинуто теоретичні засади проектування ВІД на основі використання:

- запропонованої методики пропорційного перерахунку, яка базується на зв'язку енергетичних показників машин базової та нової, що геометрично їй подібна, з їх лінійними розмірами, числом витків і активним опором обмотки для визначення конструктивних параметрів двигунів заданої потужності і частоти обертання;
- аналітичних залежностей максимального і середнього електромагнітного моментів та його пульсацій від внутрішнього діаметра статора, кутових величин полюсів статора і ротора, що дозволяє підвищити ефективність проектування ВІД і отримати оптимальний його варіант із заданим середнім електромагнітним моментом з мінімальними пульсаціями.

9. Розроблено математичні моделі вентильно-індукторних двигунів, в яких враховується взаємний вплив індукторної машини, комутатора, системи керування,

періодичного характеру навантаження, з використанням нелінійних залежностей індуктивності фази статора від струму та кута повороту ротора відносно фази статора та розроблених алгоритмів регулювання частоти обертання ВІД, що дозволили проводити аналіз динамічних режимів та розробити рекомендації щодо формування ефективних робочих характеристики двигунів за зміни напруги живлення і кутів комутації та навантаження.

10. За допомогою математичного моделювання обґрунтована доцільність врахування періодичного навантаження при розрахунках відносних пульсацій частоти обертання ротора ВІД за її зміни у квазісталих режимах. Вперше встановлено, що для ВІД одноциліндрових поршневих компресорів розбіжність результатів при розрахунках з періодичним і сталим навантаженням складає 10 ... 90 % у діапазоні частоти обертання 1:6.

11. Розроблено принцип регулювання частоти обертання ВІД одноциліндрових поршневих компресорів за зміни напруги живлення і кутів комутації із забезпеченням максимальних значень ККД і необхідного регламентованого рівня їх пульсацій у робочому діапазоні з врахуванням періодичного навантаження.

12. Достовірність результатів математичного моделювання квазісталих режимів двигунів підтверджено співставленням результатів чисельних та експериментальних досліджень: асинхронного дво полюсного двигуна АІВ71А2Ф2 у складі поршневих двоциліндрових компресорів ВР-400 й ВР-800, розбіжність результатів не перевищує 2%; ВІД з комутатором з С-скиданням і коливальним поверненням енергії, розбіжності значень струмів фаз і ККД не перевищують відповідно 8,5% і 7%.

13. Науково обґрунтовано оптимальні режими роботи АД насосної установки багатоповерхового будинку при регулюванні частоти і напруги живлення з врахуванням особливостей навантаження шляхом чисельних досліджень за допомогою розробленої математичної моделі з використанням критерію комплексної оцінки енергоефективності цієї системи, який враховує її гідравлічні опори і необхідний мінімальний напір в залежності від витрат згідно добового

графіку водопостачання, що дозволяє підвищити енергоефективність ЕМС до 23 % в порівнянні з нерегульованим АД

14. Обґрунтовано ефективність застосування ВІД для механізмів зі змінним навантаженням: насосних установок багатоповерхових будинків завдяки відсутності нестійких режимів, що обумовлено їх м'якою механічною характеристикою; насосів і поршневих компресорів завдяки підвищенню ККД в робочих режимах до 6% в порівнянні з АД; верстат-гойдалок із забезпеченням регулювання і стабілізації частоти обертання кривошипа на рівні 15 об/хв згідно технологічних вимог шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації.

15. Розроблено рекомендації щодо модернізації серійних АД, що працюють в умовах змінного навантаження, використання нерегульованих трифазних АД з пульсуючим навантаженням для двоциліндрових поршневих компресорів і однофазних АД з робочим і пусковим конденсаторами з синусною обмоткою статора – для одноциліндрових поршневих компресорів; забезпечення енергоефективної роботи частотно-регульованих асинхронних двигунів електроприводів компресорів і насосів, зокрема багатоповерхових будинків.

16. Результати роботи впроваджено: у вигляді рекомендацій щодо створення енергоефективних приводів насосів на ПрАТ "ПВІ ЗІТ Нафтогазбудізоляція" (м. Київ); у вигляді методик проектування, математичних моделей ВІД і АД в навчальному процесі та дипломному і курсовому проектуванні в Київському національному інституті технології та дизайну для розроблення енергоефективних приводів побутової техніки; у вигляді математичних моделей і їх програмних реалізацій при виконанні студентами бакалаврських та магістерських робіт, присвячених дослідженню і проектуванню асинхронних двигунів підвищеної ефективності для систем насосного і компресорного обладнання в Національному технічному університеті України "КПІ" ім. Ігоря Сікорського.

17. Результати досліджень пропонується використати для розробки енергоефективних приводів різноманітного технологічного обладнання підвищеної ефективності комунального, сільськогосподарського і промислового призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аветисян Дж., Соколов В.С., Хан В.Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. М.: Энергия, 1976. 208 с.
2. Адаменко А.И. Методы исследования несимметричных асинхронных машин. К.: Наук. думка, 1969. 272 с.
3. Алиев И.И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах. М.: ИП Радио Софт, 2004. 128 с.
4. Антонов А.Е., Радимов И.Н., Рымша В.В. Сопоставительный анализ вентильных двигателей с пассивным и активным ротором. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2005. № 1(10). С. 53-56.
5. Артамонов В.Ю., Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Результаты оптимального проектирования асинхронных двигателей для некоторых нестандартных условий эксплуатации. *Електротехніка*. 1990. № 10. С. 11-15.
6. Артамонов В.Ю., Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А. Подход к оптимальному проектированию асинхронных двигателей для нестандартных условий эксплуатации. *Електротехніка*. 1990. № 11. С. 66-69.
7. Артемюк Б.Т. Асинхронные двигатели при периодической нагрузке. К.: Техніка, 1972. 200 с.
8. Афанасьев А.А. Линейные преобразования переменных в теории вентильно-индукторного двигателя. *Електричество*. 2004. № 4.
9. Ахунов Т.А., Макаров Л.Н., Бычков М.Г., Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод – перспективы применения. *Приводная техніка*. 2001. № 2. С. 14-17.
10. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учебн. пособие для студентов вузов. М.: Высш. школа, 1982. 272 с.

11. Беспалов В.Л., Мовсесян С.Ж., Мощинский Ю.А. Оптимальное проектирование асинхронных двигателей для режимов частых реверсов. *Электротехника*. 1990. № 1. С. 23-25.
12. Бибик Е.В., Войтех А.А., Кисленко В.И., Попович А.Н. Исследование динамических режимов работы асинхронных двигателей малой мощности с учетом их несимметрии, нелинейности предвключенных элементов и нагрузки. *Электротехника*. 1995. № 3. С. 42-43.
13. Бібік О.В., Попович О.М. Врахування квазистатичних режимів при розробці асинхронних двигунів із змінним характером навантаження. *Наук. праці КДПУ*. 2004. Вип. 3(26). С. 23-24.
14. Бибик О.В. Исследование динамических режимов асинхронных двигателей в составе электромеханических систем с целью их оптимального проектирования. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2004. № 2(8). С.129.
15. Бибик Е.В., Попович А.Н. Анализ и учет квазистатики при математическом моделировании асинхронных двигателей с переменным характером нагрузки: материалы межд. науч.-тех. конф. «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах», м. Севастополь, 20-24 сентября. 2004. С. 14.
16. Бибик Е.В., Попович А.Н., Головань И.В. Исследования квазистатических режимов асинхронного двигателя при пульсирующей и периодической нагрузках. *Технічна електродинаміка*. 2006. Ч. 2. С. 99-102. Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність».
17. Бібік О.В., Попович О.М. Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу в квазістатичних режимах роботи. *Електротехніка і електромеханіка*. 2007. № 3. С. 12-14.
18. Бібік О.В. Аналіз квазістатичних режимів асинхронного електропривода з метою підвищення його енергоефективності. *Пр. Ін-ту Інституту електродинаміки НАН України*. 2007. № 1(16). С. 119-120.

19. Бібік О.В. Формування критерію визначення ефекту від урахування квазістатистики. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України*. 2008. Вип. 20. С. 40.
20. Бібік О.В., Мазуренко Л.І., Жуков Л.О. Дослідження квазістатичних режимів вентильно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. 2012. № 3. С. 416-418. Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика".
21. Бібік О.В. Формування енергоефективних режимів роботи однофазних асинхронних конденсаторних двигунів з періодичним навантаженням. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 33. С. 45-53.
22. Библик Е.В. Анализ режимов вентильно-индукторного двигателя поршневого компрессора: матеріали XII міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах». Севастополь, 23-27 серпня 2013 р. Севастопольський Національний техн. ун-т. 2013. С. 35-36.
23. Бібік О.В., Гребеніков В.В., Приймак М.В., Гамалія Р. Проектування вентильно-реактивного двигуна зі зниженими пульсаціями електромагнітного моменту. *Технічна електродинаміка*. 2014. С. 117-119.
24. Бібік О.В., Клименко В. Г., Поліщук В.О. Вентильно-індукторний двигун з системою керування для приводу верстат-гойдалок: *матеріали VII міжн. наук.-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина»* / Зб. наук. праць НТУУ «КПІ». Київ. 2015. С. 63 – 64.
25. Бібік О.В., Зайченко С.В., Клименко В.Г., Лафа Є.Ф. Верстат-гойдалка з регульованим приводом: пат. 98824 України: МПК 04В 47/02. № u 201412240 ; заявл. 13.11.2014 ; опубл. 12.05.2016, Бюл. № 9..
26. Бібік О.В. Аналіз і основні тенденції розвитку електромеханічних перетворювачів енергії для систем з періодичним навантаженням. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 43. С. 37 – 43..

27. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 38-45.
28. Бібік О.В., Гребеніков В.В. Аналіз впливу магнітних систем на характеристики вентильно-реактивних та синхронно-реактивних двигунів. *Гідроенергетика України*. 2016. № 3. С. 47-50.
29. Бібік О.В. Вентильно-індукторний привод насосної установки багатоповерхового будинку. *Пр. Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. № 45. С.38-45.
30. Бібік О.В. Розроблення вентильно-індукторних двигунів на основі методики пропорційного перерахунку. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. № 52. С.33 -39.
31. Бібік О.В. Обґрунтування підходів до проектування асинхронних двигунів із змінним навантаженням. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. № 1. С. 94 – 98.
32. Бібік О.В., Мазуренко Л.І., Шихненко М.О. Формування характеристик робочих режимів вентильно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2019. № 4. С.12–16.
33. Блавзевич Ю.Г., Ракицкий Л.Б. Повышение эффективности метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) при решении задач оптимизации электрических машин. *Проблемы технической электродинамики*. 1972. Вып. 33. С. 26-32.
34. Бойко В.С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ. К.: Реал Прінт, 2004. 695 с.
35. Браславский И.Я., Плотников Ю.В. Математические модели для определения энергопотребления различными типами асинхронных электроприводов и примеры их использования. *Электротехника*. 2005. № 9. С. 14-18.
36. Букарос А.Ю., Онищенко О.А. Система управления однофазным электроприводом герметичного компрессора. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2006. № 67. С. 32-36.

37. Букарос А.Ю., Онищенко О.А. Исследование системы частотного управления однофазным электродвигателем герметичного компрессора. *Холодильна техніка і технологія*. 2008. № 5 (115). С. 48-50.
38. Букарос А.Ю. Асинхронный электропривод герметичных компрессорів малих холодильных установок: автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Одеський нац. політех. ун-т. Одеса, 2013. 24 с.
39. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
40. Бычков М.Г. Компоненты фирмы MOTOROLA для электропривода. М.: Motorola, 1997. 56 с.
41. Бычков М.Г., Сусси Ринах Самир. Расчетные соотношения для определения главных размеров вентильно-индукторной машины. *Электротехника*. 2000. №3. С. 15-19.
42. Бычков М.Г. Вентильно-индукторный электропривод: современное состояние и перспективы развития. *Рынок электротехники*. 2007. № 2. С. 4-14.
43. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. 256 с.
44. Васильев Л.А. Боев А.Е. Определение потерь в стали вентильного реактивного двигателя. Донбас-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених [Електронний ресурс]: [матеріали V науково-практичної конференції]. Донецьк, 25-27 травня 2010. ДВНЗ "ДонНТУ", 2010. С. 315-319.
45. Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії. К.: НТУУ "КПІ", 2003. 161 с.
46. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: навч. посіб. для студ. ВНЗ. К.: НТУУ "КПІ", 2007. 192 с.
47. Вендахман Б., Живица Ю.В., Онищенко О.А. Резервы снижения энергопотребления холодильных установок при управлении электроприводом компрессоров. *Холодильна техніка і технологія*. 2007. № 5 (108). С. 25-29.

48. Виноградов А.Б. Минимизация пульсаций электромагнитного момента вентильно-индукторного электропривода. *Электричество*. 2008. № 2. С. 39-48.
49. Войтех А.А., Попович А.Н. Моделирование переходных процессов в полюсопереключаемых асинхронных двигателях. К: Наук. думка, 1989. 152 с.
50. Войтех А.А., Попович А.Н. Рабочие характеристики асинхронной машины при несинусоидальных токах. *Технічна електродинаміка*. 1999. № 2. С. 25-28.
51. Войтех А.А., Попович А.Н., Бибик Е.В. Коэффициент мощности при несинусоидальных процессах. *Технічна електродинаміка*. 2000. Ч. 4. С. 11-12. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки».
52. Войтех А.А., Попович А.Н., Бибик Е.В. Математическая модель для исследования рабочих характеристик асинхронного двигателя, нагруженного вибратором. *Науч. труды КГПУ «Пробл. создания новых машин и технологий»*. 2001. Вып. 1/2001(10). С. 300-303.
53. Войтех А.А., Попович А.Н., Бибик Е.В. Математическая модель оптимального проектирования асинхронного двигателя с предвключенными конденсаторами для тяжелых условий пуска. *Наук. праці КДПУ*. 2002. Вип. 1(12). С. 361-363.
54. Войтех А.А., Попович А.Н., Бибик Е.В. Учет коэффициента мощности при оптимизации электромеханических систем для переходных и квазиустановившихся режимов работы. *Техническая электродинамика*. 2003. № 2. С. 36-42.
55. Войтех В.А. Частотное регулирование скорости вращения асинхронных двигателей компрессоров бытовых холодильников. *Техническая электродинамика*. 2004. Ч. 3. С. 61-62. Темат. вып. «Проблемы современной электротехники».
56. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
57. Воскресенский А.П., Мордвинов Ю.В., Сорокер Т.Г. Об оптимальном проектировании серии асинхронных двигателей 4А. *Электротехника*. 1976. № 10. С.10-13.

58. Гаинцев Ю.В. Еще раз о вентильно-индукторном электроприводе. *Электротехника*. 1998. № 6. С. 25–27.
59. Галайко Л.П. Расчет магнитных потерь в вентильных индукторных двигателях *Вісник НТУ ХПИ*. 2000. № 84. С. 48-51.
60. Галайко Л.П. Имитационное моделирование динамических характеристик вентильно–индукторного двигателя стиральной машины. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2010. № 55. С. 9-12.
61. Геминтерн В.И., Каган Б.М. Методы оптимального проектирования. М.: Энергия, 1980. 160 с.
62. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.
63. Глинкин С.А., Захаров А.В. Опыт конструирования и освоения производства опытно-промышленной партии вентильно-индукторных двигателей. *Вестник ИГЭУ*. Вып. 1. 2015. С. 1-7.
64. Голландцев Ю.А., Гутнер И.А. Вентильно-индукторный реактивный двигатель. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2002. № 8. С. 12-18.
65. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ, ЦНИИ “Электроприбор”, 2003. 148 с.
66. Голландцев Ю.А. Пульсации пускового момента вентильного индукторно-реактивного двигателя. *Электричество*. 2003. № 6. С. 37-42.
67. Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели прецизионных следящих систем электропривода: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.09.01 /СПб гос. политех. ун-т, СПб., 2005. 34 с.
68. Гольдберг О.Д. Испытания электрических машин: учебник для вузов по спец. «Электромеханика». М.: Высш. шк., 1980. 255 с.
69. Гулий М.В. Вентильно-реактивный электродвигун для апаратів штучної вентиляції легенів: автореф. ... канд. техн. наук: 05.09.01/Одеський нац. політех. ун-т. Одеса, 2010. 17 с.
70. Гусейнов Ф.Г., Мамедяров О.С. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики. М.: Энергоатомиздат, 1988. 151 с.

71. Домбровский В.В., Зайчик В.М. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования. Л.: Энергоатомиздат: Ленингр. отд. 1990. 368 с.
72. Егоров А.В., Улюмджиев А.С. Альтернативное применение и моделирование вентильного электропривода в штанговых скважинных насосных установках. *Труды РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина*. 2012. № 2(267). С. 32-46.
73. Живица В.И., Онищенко О.А., Радимов И.Н., Шевченко В.Б. Современный электропривод холодильных установок. *Холодильная техника и технология*. 1999. Вып. 64. С. 112-116.
74. Живица Ю.В., Чумак І.Г., Онищенко О.А. Алгоритм виміру питомої витрати електроенергії на вироблення холоду. *Холодильна техніка і технологія*. 2005. № 4 (96). С. 53-56.
75. Загирняк М.В., Прус В.В., Невзлин Б.И. Функциональная взаимосвязь параметров электрических машин, аппаратов и трансформаторов с обобщенным линейным размером. Х.: Точка, 2014. 188 с.
76. Зеликовский И.Х., Каплан Л.Г. Малые холодильные машины и установки: справочник. М.: Агропромиздат, 1989. 672 с.
77. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Раскрой листов магнитопровода вентильных индукторно-реактивных двигателей. *Електротехніка і електромеханіка*. 2008. № 5. С. 16-19.
78. Зинченко Е.Е., Финкельштейн В.Б. Методика расчёта вентильного индукторно–реактивного двигателя. *Електротехніка і електромеханіка*. 2009. № 4. С. 24–29.
79. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. М.: Высш. шк., 1989. 312 с.
80. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебн. пособ. в 2-х т., 2-е изд. М.: МЭИ, 2004. 652 с.
81. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975. 184 с.
82. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод перед выходом на широкий рынок. *Приводная техника*. 1998. № 3. С. 2-5.

83. Ильинский Н.Ф. Перспективы развития регулируемого электропривода. *Электричество*. 2003. № 3. С. 2-7.
84. Ильинский Н.Ф., Штайнбрунн Й., Прудникова Ю.И., Федоров А.Г., Бычкова Е.В. Проектирование вентильно-индукторных машин общепромышленного назначения. *Вестник МЭИ*. 2004. № 1. С. 37-43.
85. Карпович О.Я., Онищенко О.А. Компьютерное исследование динамических свойств вентильно-индукторного двигателя. *Електротехніка і електромеханіка*. 2003. № 4. С. 42-45.
86. Карпович О.Я. Исследование электромеханических свойств вентильно-индукторного электропривода. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2006. № 66. С. 59-61.
87. Карпович О.Я., Онищенко О.А. Система управления вентильно-индукторным электродвигателем микрокомпрессора. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2011. № 03(79). С. 204-206.
88. Карпович О.Я., Онищенко О.А. Верификация математической модели вентильно-индукторного электродвигателя микрокомпрессора. *Вісник НТТУ "ХП"*. 2011. № 24. С. 77-82.
89. Кетков Ю.А., Кетков, М.М. Шульц. *MATLAB 6х.: программирование численных методов*. СПб.: БХВ – Петербург, 2004. 672 с.
90. Кисленко В.И., Попович А.Н., Бибик Е.В., Дручок В.В. Учет влияния динамических режимов при расчете привода ротационного компрессора. *Регулируемые асинхронные двигатели: зб. наук. пр. К.*, 1992. С. 146-158.
91. Кисленко В.И., Бибик Е.В. Переходные процессы в асинхронных двигателях с позисторным пуском: *proceeding of the 2nd International scientific and technical conference "Unconventional electromechanical and electrotechnical systems (ISTC UEES)"*, Szczecin, Poland. 1996. V. 2. P. 239-242.
92. Клевцов А.В. Средства оптимизации потребления электроэнергии. М.: СОЛОН – Пресс, 2004. 240 с.
93. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. М.: Энергоиздат, 1982. 504 с.

94. Кравчик А.Э., Стрельбицкий Э.К., Шлаф М.М. Выбор и применение асинхронных двигателей. Энергоатомиздат. 1987. 96 с.
95. Красовский А.Б., Бычков М.Г. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе. *Электричество*. 2001. № 10. С. 33-43.
96. Красовский А.Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного двигателя. *Электричество*. 2003. № 3. С. 35-44.
97. Коломейцев Л.Ф., Квятковский И.А., Пахомин С.А., Реднов Ф.А. Оптимизация реактивного индукторного двигателя с автономным электропитанием. *Изв. вузов. Электромеханика*. 1999. №2. С. 12-15.
98. Компрессоры и компрессорно-конденсаторные агрегаты CUBIGEL. *Холодильная техника*. № 6. 2014. С. 22-24.
99. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф. Проектирование электрических машин: учебник для вузов под ред. И.П.Копылова, 3-е изд. М.: Высшая школа, 2002. 757 с.
100. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.
101. Костенко М.П. Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х. ч. Ч.1. высш. техн. учеб. заведений. Л.: «Энергия», 1972. 544 с.
102. Крон Г. Применение тензорного анализа в электротехнике. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. 275 с.
103. Кузнецов В.А., Матвеев А.В. Дискретная математическая модель вентильно-индукторного двигателя. *Электричество*. 2000. № 8. С. 22-27.
104. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели: учебн. пособ. М.: МЭИ, 2003. 70 с.
105. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Особенности проектирования индукторной машины для вентильно-индукторного двигателя. *Изв. вузов. Электромеханика*. 2008. № 1. С. 60-68.

106. Кузнецов В.А., Садовский Л.А., Виноградов В.Л., Лопатин В.В. Особенности расчета индукторных двигателей для вентильного электропривода. *Электротехника*. 1998. № 6. С. 35-42.
107. Кулизаде К.Н., Хайкин И.Е. Электроэнергетика насосной нефтедобычи. М.: Недра, 1971. 208 с.
108. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках. М.: Энергостомиздат, 2006. 360 с.
109. Лісник В.Я, Попович О.М., Бібік О.В., Шуруб Ю.В. Математичні моделі, методи дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин із особливостями живлення та навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 5. С. 42-44.
110. Лозинський О.Ю., Калужний Б.С., Маляр А.В. Дослідження електроприводу штангової глибинонасосної установки. *Технічна електродинаміка*. 2008. С. 37-40. Тематич. вип. "Проблеми сучасної електротехніки".
111. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Проектирование асинхронных микродвигателей с применением ЭВМ. М.: Высш. школа, 1980. 359 с.
112. Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности. М.: Высш. школа, 2002. 512 с.
113. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Шуруб Ю.В., Головань І.В., Вербовий А.П., Джура О.В. Електромеханічні перетворювачі енергії. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2009. Вип. 23. С. 48-56.
114. Мазуренко Л.І., Бібік О.В. Стан і перспективи розвитку вентильно-індукторних машин: матеріали. матеріали міжн. наук.-техн. конф «Проблеми енергозбереження в агропромисловій та природоохоронній сферах», м. Київ, 14-15 жовтня. 2010 р. С. 19-21.
115. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В. Електричні машини змінного струму та машинно-вентильні комплекси на їх основі. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2010. Вип. 26. С. 63-72.
116. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Джура О.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І. Електромеханічні

- машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 29. С. 62-70.
117. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П. Автономні енергосистеми. Електричні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 32. С. 58-66.
 118. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Жуков Л.О. Технічна реалізація та експериментальні дослідження вентильно-індукторного двигуна. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ, 2013. Вип. 2/2013 (22). Ч. 2. С. 158-161.
 119. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О. А., Шихненко М. О. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С–скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2016. № 11(1183). С. 64-69. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.
 120. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І. Електричні генератори і двигуни змінного струму. Електромеханотронні перетворювачі енергії. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2013. Вип. 35. С. 58-67.
 121. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Попович О.М., Бібік О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Романенко В.І. Розвиток теорії, вдосконалення математичних моделей, дослідження електричних машин і електромеханічних систем. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 38. С. 73-81.
 122. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Шихненко М.О., Клименко В.Г. Спосіб стабілізації частоти обертання вентильно-індукторного двигуна: пат. 107247 Україна: МПК Н02Р 6/08, Н02Р 8/12, Н02К 19/06. № у 2015 12131 ; заявл. 07.12.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.
 123. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Клименко В.Г., Шихненко М.О. Оцінка можливості використання вентильно-реактивного двигуна у складі верстат-

- гойдалки. Вісник НТУ «ХП». 2017. № 1(1223). С. 97-100. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.
124. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Бібік О.В., Гамалія Р.В., Шихненко М.О. Електромеханічні перетворювачі енергії для систем електрогенерації та електропривода. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. № 54. С. 63 -74.
 125. Малафеев С.И., Шабает В.А., Захаров А.В. Анализ электромагнитного момента вентильно-индукторного двигателя в мехатронной системе с нелинейным токовым управлением. *Электротехника*. 2006. № 3. С. 37-42.
 126. Маляр А.В. Динаміка електроприводу штангової нафтовидобувної установки. *Технічна електродинаміка*. 2007. № 2. С. 50-54.
 127. Маляр В.С., Маляр А.В. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств. *Электронное моделирование*. 2005. Т.27. № 3. С. 39-53.
 128. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрейшин А.С. Система автоматичного керування роботою штангової глибиннопомпової установки з врахуванням дебіту пласта. *Наукові праці Донецького націон. техн. ун-ту*. 2011. № 186. С. 267-270.
 129. Меркин Г.Б. Конденсаторные электродвигатели для промышленности и транспорта. М.-Л.: Энергия, 1966. 223 с.
 130. Могильников В.С., Мартынов В.Н. Анализ работы асинхронного двигателя при пульсирующей нагрузке. *Электричество*. 1982. № 11. С. 57-59.
 131. Молотиллов Б.В., Миронов Л.В., Петренко А.Г. и др. Холоднокатанные электротехнические стали: справ. изд. М.: Металлургия, 1989. 168 с.
 132. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Использование энергетически эффективных двигателей в регулируемом приводе насосов. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2008. № 5. С. 29-32.
 133. Никифоров Б.В., Цветкова А.А. Исследования вентильного индукторного двигателя в составе насосного агрегата. *Электротехника*. 2007. № 6. С. 24-33.

134. Овакимян А.А. Разработка и исследование асинхронных конденсаторных двигателей для герметичных ротационных компрессоров с учетом переменной нагрузки: дис....канд. техн. наук: 05.09.01 / МЭИ. М., 1987. 237 с.
135. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и приводы на их основе (малая и средняя мощность). СПб.: КОРОНА-Век, 2006. 336 с.
136. Общий каталог. Компрессоры и конденсаторные агрегаты для коммерческой холодильной техники. *Huayi Compressors Barselona*. 2014. 88 с.
137. Онищенко О.А. Наукове обґрунтування і розробка автоматизованих систем керування холоди́льно-компресорними установками малої продуктивності: автореф. дис....докт. техн. наук: 05.09.03/ Одеський політех. ун-т/ Одеса, 2010. 36 с.
138. Остриров В.Н., Уткин С.Ю. Сравнительный анализ схем силовых преобразователей для вентильно-индукторного электропривода массового применения. *Приводная техника*. 2000. № 4. С. 44-50.
139. Остриров В.Н., Уткин С.Ю. Силовой преобразователь для вентильно-индукторного привода массового применения. *Вестник МЭИ: Электротехника, электромеханика*. 2000. № 5. С. 8-13.
140. Пахомин С.А., Киреев А.В. Пульсации момента тягового реактивного индукторного двигателя в режиме ограничения тока. *Изв. вузов. Электромеханика*. 2004. № 1. С. 25-28.
141. Петрушин А.Д., Янов В.П. Оптимизация режимов работы тягового вентильно-индукторного двигателя. *Изв. вузов. Электромеханика*. 1999. № 3. С. 33-38.
142. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе. О.: Наука и техника, 2006. 320 с.
143. Петрушин В.С., Якимец А.М. Исследование энергетических показателей асинхронных двигателей в динамических режимах при параметрическом управлении. *Техническая электродинамика*. 2001. № 5. С. 50-52.
144. Петрушин А.Д. Оптимизация активной части вентильно-индукторного двигателя методом Нелдера-Мида. *Изв. Томского политех. ун-та. Инженеринг георесурсов*. 2016. Т. 324. № 6. С. 83-92.

145. Петунин А.А. Вентильно–индукторный электропривод для водяных насосов центробежного типа: дис. д-ра техн. наук: спец.05.09.03. Липецкий гос. техн. ун-т, Липецк. 2005. 198 с.
146. Польовий Є.В., Садовой О.В. Дослідження релейного регулятора струму вентильно-реактивного електропривода з розширеною зоною комутації. *Вісник Кременчуцького держ. ун-ту ім. М.Остроградського*. 2010. Вип. 3/2010 (62). Ч. 1. С. 37-40.
147. Попович А.Н. Математическая модель для расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя с учетом потерь в стали. *Техническая электродинамика*. 1999. № 4. С. 45-52.
148. Попович А.Н. Математичні моделі, параметри та характеристики асинхронних двигунів електромеханотронних систем: автореф. дис....докт. техн. наук: 05.09.01. Ін-т електродинаміки НАН України. К. 2015. 39 с.
149. Попович А.Н., Шуруб Ю.В., Бирик Е.В. Определение и учет коэффициента мощности при улучшении технико-экономических характеристик асинхронных электроприводов в динамических режимах с учетом несимметрии. *Технічна електродинаміка*. 2003. № 6. С. 42-49.
150. Попович О.М., Бібик О.В., Шуруб Ю.В. Покращення техніко-економічних характеристик електромеханічних систем шляхом комплексного проектування. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2005. № 2(11). Ч.1. С. 104-107.
151. Попович О.М., Головань І.В. Врахування джерела живлення при визначенні втрат в сталі асинхронних двигунів. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КПДУ*. 2005. Вип.4. 2005 (33). С.150-152.
152. Попович О.М., Бібик О.В., Шуруб Ю.В., Головань І.В. Моделі та методи для комплексного дослідження та проектування електромеханічних систем. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2006. № 2(14). С. 68-71.
153. Попович О.М., Бібик О.В., Вербовий А.П., Шуруб Ю.В., Шуруб В.А. Енерго- та ресурсозбереження завдяки раціональному конструюванню, проектуванню

- та експлуатації асинхронних електромеханічних перетворювачів енергії та електромеханічних систем на їх базі. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2007. № 1(16). С. 109-115.
154. Попович О.М., Бібік О.В., Оноприч В.П., Головань І.В., Маслюк В.А. Вплив матеріалу магнітопроводу на робочі характеристики асинхронних двигунів при зміні частоти живлення. *Тез. доп. міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах»*, Севастополь. СевНТУ. 2007. С. 47-48.
 155. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 4. С. 25-32.
 156. Попович О.М., Бібік О.В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування. *Вісник НТУ «ХП»*. 2018. № 5 (1281). С. 79-82. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії.
 157. Постников В.А., Семисалов В.В. Исследование динамических режимов шаговых и вентильных двигателей малой мощности на базе модели обобщенной синхронной машины. *Электричество*. 2002. № 5. С. 53–60.
 158. Примаченко Д.В., Ракицкий Л.Б., Лень Л.Н., Сандлер В.Л. Электроприводы компрессоров с улучшенными энергетическими показателями. *Пути повышения качества электробытовых машин и приборов: сб. науч. тр.* К.: 1987. С 27-33.
 159. Процына З.П. Параметризация геометрии вентильно-индукторного двигателя. *Электротехнические и компьютерные системы*. 2016. № 22 (98). 2016. С. 239-243.
 160. Птах Г.К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт. *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2015. Т. 2. № 3. С. 23-33.
 161. Пуйло Г.В., Порайко А.С., Радимов И.Н., Рымша В.В. Влияние геометрических соотношений зубцовой зоны на электромагнитный момент

- вентильно-реактивного двигателя. *Вісник нац. ун-та «Львовська політехніка»*. 2003. № 485. С. 112-117. Темат. вып. «Електроенергетическіе і електромеханіческіе системи».
162. Пуйло Г.В., Петрушин В.С., Якимец А.М. Проектирование регулируемых асинхронных двигателей для циклических нагрузок. *Електротехніка і електромеханіка*. 2002. № 3. С. 68-69.
163. Радимов И.Н., Рымша В.В., Малеванный О.Е. Моделирование режимов работы вентильно-индукторного двигателя. *Електротехніка і електромеханіка*. 2002. № 2. С. 60-64.
164. Радимов И.Н., Рымша В.В., Процына З.П., Гулый М.В. Влияние параметров коммутации на характеристики вентильно-реактивного электропривода *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2006. № 67. С. 82-87.
165. Радимов И.Н., Рымша В.В., Процына З.П. Коэффициенты полюсного перекрытия трехфазного вентильно-реактивного двигателя. *Електромашиностроение и электрооборудование*. 2009. № 73. С. 63-67.
166. Радин В.И., Лондин Й., Розенкноп В.Д. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.
167. Ракицкий Л.Б., Примаченко Д.В., Ввозный В.Ф. Повышение эффективности электродвигателей компрессоров бытовых холодильников. *Технічна електродинаміка*. 2002. № 4. С. 69-72.
168. Растрюгин Л.А. Стохастический синтез тестовых задач поисковой оптимизации. *Автоматика и вычислительная техника*. 1968. № 2. С. 1-6.
169. Редкозуб Б.Д. Влияние изменения нагрузки на характеристики герметичного двухцилиндрового компрессора. *Холодильная техника*. 1966. № 8. С. 21-24.
170. Редкозуб Б.Д. К вопросу о выборе махового момента герметичного компрессора. *Холодильная техника*. 1968. № 5. С. 21-24.
171. Редкозуб Б.Д., Дорош В.С. Исследование пускового режима герметичного поршневого компрессора. *Холодильная техника*. 1971. № 3. С. 24-27.
172. Редкозуб Б.Д., Якобсон В.Б. Динамические характеристики поршневого компрессора. *Холодильная техника*. 1972. № 4. С. 9-12.

- 173.Рисованный С.В., Финкельштейн В.Б. Проектирование вентильно-реактивных двигателей. Х.: ХНУГХ, 2004. 245 с.
- 174.Рожицкий Д.Б., Баталова Е.В., Филаткин М.С. Результаты испытаний реактивного индукторного привода насосного агрегата с регулируемой частотой вращения в системах тепло- и водоснабжения. *Энергосбережение*. 2005. № 2. С.38-42.
- 175.Рымша В.В., Радимов И.Н. Радиальные силы в вентильно-реактивных электродвигателях. *Електротехніка і електромеханіка*. 2006. №1. С.51-53.
- 176.Рымша В.В., Радимов И.Н., Чан Тхи Тху Хьонг. Моделирование и оптимизация вентильного исполнительного устройства. *Збірник наукових праць Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2008. № 21. С. 126-130.
- 177.Рымша В.В. Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя. *Електротехніка і електромеханіка*. 2010. № 6. С. 24-26.
- 178.Рымша В.В., Радимов И.Н., Процына З.П., Кравченко П.А. Сопоставительный анализ энергетических свойств вентильно-реактивных двигателей с различным числом фаз. *Електротехніка і електромеханіка*. 2010. № 6. С. 39-41.
- 179.Садовой О.В., Сохіна Ю.В., Польовий Є.В. Вентильний реактивний електропривод з використанням позитивних зворотних зв'язків. 2011. С. 82-84.
- 180.Садовский Л.А., Виноградов В.Л. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого привода. *Электротехника*. 2000. № 2. С. 54-58.
- 181.Сарач Б.М., Бастунский А.М. Заводские и натурные испытания насосных агрегатов с преобразователями частоты. *Электротехника*. 1995. № 7. С. 19-20.
- 182.Смирнов Ю.В. Усовершенствование асинхронных электроприводов машин с периодически изменяющейся нагрузкой. *Электротехника*. 2007. № 6. С. 13-16.

- 183.Смирнов Ю.В. Оптимизация регулируемых электроприводов с циклической ударной нагрузкой. *Электричество*. 1995. № 9. С. 28-31.
- 184.Смирнов Ю.В. Расчет основных параметров электропривода машин с пульсирующей нагрузкой. *Электротехника*. 2004. № 1. С. 52-56.
- 185.Смирнов Ю.В. Оптимизация асинхронных электроприводов производственных машин с циклической ударной нагрузкой. *Электричество*. 1995. № 6. С. 59-62.
- 186.Смирнов Ю.В. Совершенствование методики выбора асинхронных электродвигателей. *Электричество*. 1994. № 5. С. 50-52.
- 187.Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Под ред. Маминакянца Л.Г. 4-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
- 188.Тенденції розвитку світових ринків компресорів. *Холод*. 2008. С. 2-11. Спец. вип.
- 189.Ткачук В.И. Математическая модель вентильного реактивного двигателя. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 1998. № 50 . С. 77-82.
- 190.Ткачук В. Електромеханотроніка: підруч. Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2006. 440 с.
- 191.Толмачов С.Т., Власенко В.А., Бондаренко Н.С. Комбінований метод моделювання вентильно-індукторного двигуна. Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. Вип. 4/2010 (63). Ч. 1. С. 163-166.
- 192.Тонкаль В.Е. Новосельцев А.В., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Стрелков М.Т., Яценко Ю.А. Баланс энергий в электрических цепях. К.: Наук. думка, 1992. 312 с.
- 193.Туровский Я. Техническая электродинамика. М.: Энергия, 1974. 488с.
- 194.Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии / пер. с англ. М.: Энергия, 1964. 528 с.
- 195.Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. К.: Наук. думка, 1979. 206 с.
- 196.Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей: методическое пособие. М.: МЭИ, 2005. 56 с.

197. Френкель М.И. Поршневые компрессоры. М.; Л.: ГНТИМЛ, 1949. 395 с.
198. Чабан В.И. Основы теории переходных процессов электромашиных систем. Львов: Вища школа, 1980. 200 с.
199. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
200. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоиздат, 1981. 576 с.
201. Чумак И.Г., Живица Ю.В., Онищенко О.А. Мониторинг и энергосберегающее управление для холодильных компрессоров. *Холодильна техніка і технологія*. 2006. № 5 (103). С. 12-18.
202. Шабаев В.А., Захаров А.В. Экспериментальное исследование двухфазных непереворсивных вентильно-индукторных двигателей. *Электротехника*. 2003. № 5. С. 62-64.
203. Шабаев В.А. Анализ критериев технико-экономического оптимума и технико-экономической целесообразности применения вентильно-индукторных двигателей в качестве приводов различных механизмов. *Электротехника*. 2008. № 4. С. 44-51.
204. Шевчук С.П., Попович О.М., Світлицький В.М. Насосні, вентиляторні та пневматичні установки: підруч. для студ. ВНЗ. К.: НТУУ «КПІ». 2010. 308 с.
205. Шинкаренко В.Ф. Основы теории эволюции электромеханических систем. К.: Наук. думка, 2002. 285 с.
206. Шумилов Ю.А. Проблемы ресурсо- та енергозбереження при проектуванні електричних машин та апаратів: курс лекцій для студентів спеціальності “Електричні машини та апарати”. К.: Абрис, 2002. 100с.
207. Шумов Ю.Н., Сафонов А.С. Энергосберегающие электрические машины (обзор зарубежных разработок). *Электричество*. 2015. № 4. С. 45-55.
208. Якобсон В.Б. Малые холодильные машины М.: Пищевая промышленность, 1977. 368 с.
209. Янко-Триницкий А.А. Уравнение переходных электромагнитных процессов асинхронного двигателя и их решение. *Электричество*. 1951. № 3. С. 18-25.

210. Andersen H.R. Motor drives for variable speed compressors: Introduction and state of the art analysis: PhD Thesis. Aalborg University, 1996. Vol. 1. 62 p.
211. Andrada P., Blanque B., Perat J.I., Torrent M., Martinez E., Sanchez J.A.. Comparative efficiency of switched reluctance and induction motor drives for slowly varying loads. *International Conference on Renewable Energies And Power Quality (ICREPQ'06)*. 2007.
212. Anwar M.N., Husain I., Radun A.V. A comprehensive design methodology for switched reluctance machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2001. Vol. 37. No. 6. P. 1682-1692.
213. Balaji M., Kamaraj V. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. *European Journal of Scientific Research ISSN 1450-216X*. Vol. 47. No. 2. 2010. P. 187-196.
214. Bibik O.V., Popovych O.M., Shurub Y.V., Golovan I.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 33 – 39.
215. Brabandere K.D., Driesen J., Belmans. The control of switched reluctance drives and their use for flywheel energy storage. *Pr. of IEEE young researchers symposium in electrical power engineering*: KU Leuven, Leuven, Belgium, 2002. Pp. 5-8.
216. Cajander D., Le-Huy H. Design and optimization of a torque controller for a switched reluctance motor drive for electric vehicles by simulation. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2006. No. 71. P. 333–344.
217. Caner Akuner, Durmus Uygun. Effects of Different Rotor and Stator Constructions on the Performance of Switched Reluctance Motors. *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering*, Istanbul, Turkey, May 27-29, 2007
218. Dongyun Lu Neural network based torque control of switched reluctance motor for hybrid vehicle propulsion Режим доступа: <http://scolar.uwinsor.ca/etd>.

- 219.Eleonora Darie, Garibald Popescu. The dynamic control of a switched reluctance drive using fuzzy logic. *Annals of the University Craiova, Electrical Engineering*. 2006. № 30. P. 186-188.
- 220.Frederik D'hulster. Switched reluctance motor (SRM) drive modeling using Flux to Simulink technology. *Flux Magazine*, January 2003. No. 41. P. 10-11.
- 221.Gacia-Tabares L., Jglesians J., Lafor M. et al. Development and testing of a 200MJ/350kW kinetic energy storage system for railways applications. *9th World congress on railway research: WCRR*, Lille, May. 2011.
- 222.General catalogue ACC. Compressors R600a – R134a. All solutions inside. www.theaccgroup.com, 2013. 8 c.
- 223.Hamid Ehsan Akhter, Virendra K. Sharmal, A. Chandra, Kamal Al-Haddad. Performance Simulation of Switched Reluctance Motor Drive System Operating With Fixed Angle Control Scheme. *Electrimacs 2002*, August 18-21.
- 224.Hoang Le-Huy, Philippe Viarouge. A Novel Unipolar Converter for Switched Reluctance Motor. *IEEE transactions on power electronics*. Vol. 5. № 4. October 1990.
- 225.Hosseini Torkaman, Ebrahim Afjei. Comprehensive Study of 2-D and 3-D Finite Element Analysis of a Switched Reluctance Motor. *Journal of Applied Sciences*. 2008. № 8. P. 2758-2763.
- 226.Jakobsen A., Rasmussen B. Energy optimization of domestic refrigerators Major energy saving by use of variable speed compressors and evaporator fans. *International Appliance Manufacturing*. 1998. P. 105-109.
- 227.Jin-Woo Switched reluctance motor Режим доступа: www.intechopen.com.
- 228.John R. Suriano. Design methodology for low speed variable reluctance motors. *Purdue University, School of Electrical Engineering*. 1992. 90 p.
- 229.Krishnan Ramu. Switched Reluctance Motor Drives. Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. CRS Press, 2001. 398 p.
- 230.Luis O. A. P. Henriques, Luis G. B. Rolim, Walter I. Suemitsu, Paulo J. C. Blanco, Joaquim A. Dente. Torque Ripple Minimization in a Switched Reluctance Drive by

- Neuro-Fuzzy Compensation. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 36. No. 5. September 2000. P. 3592-3594.
231. Matveev A. Development of Methods, Algorithms and Software for Optimal Design of Switched Reluctance Drives. *Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven*. 2006. 236 p.
232. Mehrdad Ehsani, James T. Bass, Timothy J.E. Miller, Robert L. Steigerwald. Development of a Unipolar Converter for Variable Reluctance Motor Drives. *IEEE transactions on industry application*. Vol. IA-23. № 3. May / June 1987.
233. Miller T.J.E. Switched reluctance motors and their control. Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993. 205 p.
234. Nakamura K, S. Fujio S., Ichinokura O. A method for calculating iron loss of an SR motor based on reluctance network analysis and comparison of symmetric and asymmetric excitation. *IEEE transactions on magnetics*. 2006. Vol. 42. № 10. PP. 3440-3442.
235. Ong Chee-Mun. Dynamic simulation of electric machinery. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1997. 626 p.
236. Paramasivam S., Arumugam R. Real time DSP-based adaptive controller implementation for 6/4 pole switched reluctance motor drive. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 2005. No. 27(3). P. 523-534.
237. Parasiliti F. et al. Three-phase induction motor efficiency improvements with die-cast copper rotor cage and premium steel. *Proc. Of SPEEDAM'04 symposium*. 2004.
238. Patrick L. Chapman, Scott D. Sudhoff. Design and Precise Realization of Optimized Current Waveforms for an 8/6 Switched Reluctance Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 17. No. 1. January 2002. P. 76-83.
239. Peter Balazovic, Radim Visinka. 3-Phase Switched Reluctance Motor Control with Encoder Using DSP56F80x. *Motorola*. Inc. Rev. 09/02. 2002.
240. Pollock C., Williams B.W. Power converter circuits for switched reluctance motors with minimum number of switches. *Proceedings*. Vol. 137. № 6. November.

241. Soares F., Costa Branco P. J. Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*. Vol. 37. No. 3. July 2001. P. 989-1009
242. Shoujun Song, Weiguo Liu. A Comparative Study on Modeling Methods for Switched Reluctance Machines. *Computer and Information Science*. Vol. 3. No. 2. May 2010. P. 205-210.
243. Siavash Sadeghi, Mojtaba Mirsalim, Arash Hassanpour Isfahani. Dynamic Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor in a Series Hybrid ElectronVehicle. *Acta Polytechnica Hungarica*. Vol. 7. No. 1. 2010.
244. Speed-controlled synchronous reluctance motors REEL Su Prem E: [www.e\[poclima.net/en/lcomponrnts/wlectrical_components/electric_motors/synchrinous_reluctance_motors_reel_supreme.html](http://www.e[poclima.net/en/lcomponrnts/wlectrical_components/electric_motors/synchrinous_reluctance_motors_reel_supreme.html).
245. Subramanian Vijayan, Shanmugam Paramasivam, Rengasamy Arumugam, Subhransu S. Dash, Kittu J. Poornaselvan. A practical approach to the design and implementation of speed controller for switched reluctance motor drive using fuzzy logic controller. *Journal of Electrical Engineering*. Vol. 58. No. 1. 2007. P. 39-46.
246. Taghavi S. and Pillay P. A Sizing Methodology of the Synchronous Reluctance Motor for Traction Applications. *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal*. 2014. vol. 2. P. 329-340.
247. Taghavi S. and Pillay P. A core analysis of the synchronous reluctance motor for automotive applications. *Electrical Machines (ICEM)*. 2014. *International Conference*. 2014. Pp. 961-967.
248. Venkatesan G., Arumugam R., Vasudevan M., Paramasivam S., Vijayan S. Modeling and Simulation of a Novel Switched Reluctance Motor Drive System with Power Factor Improvement. *American Journal of Applied Sciences*. No 3(1). 2006. P. 1649-1654.
249. Voitekh A., Popovich A. An Improved Procedure for the Calculation of the Electromagnetic Moment of Induction Machines. *Baltic Electrical Engineering Review*, 1997. No. 1(5). P. 42-49.

250. Wang S., Lan W. Turn-on angle searching strategy for optimized efficiency drive of switched reluctance motors,” in *Proc. 13th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2004. PP. 1873-1878.
251. Xiang-Dang Xue, K. W. E. Cheng, Member, IEEE, and S. L. Ho. Simulation of Switched Reluctance Motor Drives Using Two-Dimensional Bicubic Spline. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 17. No. 4. December 2002.
- 252..[Электронный ресурс] <http://www.femm.info/wiki/HomePage>.
- 253.[Электронный ресурс] <http://www.infolytica.com>.
- 254.[Электронный ресурс] <http://www.ansys.com>.
255. [Электронный ресурс] <http://www.comsol.com>.
256. [Электронный ресурс] <http://elcut.ru>.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Войтех А.А., Попович А.Н., Библик Е.В. Математическая модель для исследования рабочих характеристик асинхронного двигателя, нагруженного вибратором. *Науч. труды КГПУ «Пробл. создания новых машин и технологий»*. 2001. Вып. 1/2001(10). С. 295-298 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі АД, який навантажено вібратором).
2. Войтех А.А., Попович А.Н., Библик Е.В. Математическая модель оптимального проектирования асинхронного двигателя с предвключенными конденсаторами для тяжелых условий пуска. *Наук. праці КДПУ*. 2002. Вип. 1(12). С. 361-363 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі АД з конденсаторами у колі статора і мережі для оптимального проектування у складі ЕМС).
3. Войтех А.А., Попович А.Н., Библик Е.В. Учет коэффициента мощности при оптимизации электромеханических систем для переходных и квазиустановившихся режимов работы. *Техническая электродинамика*. 2003. № 2. С. 36-42 (Особистий внесок – аналіз існуючих методів та обґрунтування способу розрахунку коефіцієнта потужності при оптимізації ЕМС у квазісталих режимах).
4. Біблік О.В., Попович О.М. Врахування квазистатичних режимів при розробці асинхронних двигунів із змінним характером навантаження. *Наук. праці КДПУ*. 2004. Вип. 3(26). С. 23-24 (Особистий внесок – чисельні дослідження, обґрунтування вибору періоду повторювання АД у квазісталих режимах).
5. Библик Е.В. Исследование динамических режимов асинхронных двигателей в составе электромеханических систем с целью их оптимального проектирования. *Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины*. 2004. № 2(8). С. 129.
6. Попович О.М., Біблік О.В., Шуруб Ю.В. Покращення техніко-економічних характеристик електромеханічних систем шляхом комплексного проектування. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН Академії наук України*. 2005. № 2(11). Ч.1. С. 104-107 (Особистий внесок – обґрунтування доцільності застосування комплексного проектування АД складі ЕМС).

7. Попович О.М., Бібік О.В., Шуруб Ю.В., Головань І.В. Моделі та методи для комплексного дослідження та проектування електромеханічних систем. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2006. № 2(14). С. 68-71 (Особистий внесок – дослідження, порівняння і оцінка розбіжностей результатів розрахунків квазісталих і сталих режимів).
8. Бібік О.В. Аналіз квазістатичних режимів асинхронного електропривода з метою підвищення його енергоефективності. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2007. № 1(16). С. 119-120.
9. Бібік О.В., Попович О.М. Підвищення енергоефективності асинхронного електроприводу в квазістатичних режимах роботи. *Електротехніка і електромеханіка*. 2007. № 3. С. 12-14 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі і алгоритму оптимального проектуванні АД з урахуванням періодичного навантаження).
10. Бібік О.В. Формування критерію визначення ефекту від урахування квазістатисти. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2008. Вип. 20. С. 40.
11. Лісник В.Я, Попович О.М., Бібік О.В., Шуруб Ю.В. Математичні моделі, методи дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин із особливостями живлення та навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2008. № 5. С. 42-44 (Особистий внесок – розроблення підходу для оптимального проектування АД з урахуванням квазісталих режимів).
12. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Шуруб Ю.В., Головань І.В., Вербовий А.П., Джура О.В. Електромеханічні перетворювачі енергії. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2009. Вип. 23. С. 48-56 (Особистий внесок – розроблення засобів математичного моделювання і дослідження ВІД зі змінним навантаженням).
13. Мазуренко Л.І., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Джура О.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І. Електромеханічні машини змінного струму та електромеханічні системи на їх основі. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2011. Вип. 29. С. 62-70 (Особистий внесок –

дослідження режимів роботи конденсаторних АД та формування задач по створенню ВІД підвищеної ефективності для ЕМС з періодичним навантаженням).

14. Бібік О.В. Формування енергоефективних режимів роботи однофазних асинхронних конденсаторних двигунів з періодичним навантаженням. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. 33. С. 45-53.

15. Бібік О.В., Мазуренко Л.І., Жуков Л.О. Дослідження квазістатичних режимів вентильно-індукторних двигунів з періодичним навантаженням. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи*. 2012. № 3. С. 416-418. Темат. випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". (Особистий внесок – математична модель, дослідження режимів, висновки).

16. Мазуренко Л.І., Джура О.В., Попович О.М., Гребеніков В.В., Бібік О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Вербовий А.П., Романенко В.І. Електричні генератори і двигуни змінного струму. Електромеханотронні перетворювачі енергії. *Пр.-ці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2013. Вип. 35. С. 58-67 (Особистий внесок – аналіз характеристик ВІД, рекомендації).

17. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О.А., Жуков Л.О. Технічна реалізація та експериментальні дослідження вентильно-індукторного двигуна. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. Вип. 2/2013 (22). Ч. 2. С. 158-161 (Особистий внесок – розробка дослідного зразка і дослідження основних властивостей ВІД, рекомендації).

18. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В., Джура О.В., Попович О.М., Бібік О.В., Головань І.В., Шуруб Ю.В., Романенко В.І. Розвиток теорії, вдосконалення математичних моделей, дослідження електричних машин і електромеханічних систем. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2014. Вип. 38. С. 73-81 (Особистий внесок – аналіз експлуатаційних режимів та формування задач з підвищення енергоефективності насосних установок).

19. Бібік О.В., Гребеніков В.В., Приймак М.В., Гамалія Р. Проектування вентильно-реактивного двигуна зі зниженими пульсаціями електромагнітного моменту. *Технічна електродинаміка*. 2014. С. 117-119 (Особистий внесок –

розроблення підходу оптимального проектування ВІД з забезпеченням мінімальних пульсацій електромагнітного моменту).

20. Бібік О.В. Аналіз і основні тенденції розвитку електромеханічних перетворювачів енергії для систем з періодичним навантаженням. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. № 43. С. 37-43.

21. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Білик О. А., Шихненко М. О. Моделювання режимів та регулювання частоти обертання вентильно-індукторного двигуна з перетворювачем із С–скиданням і коливальним поверненням енергії при зміні кутів комутації. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2016. № 11(1183). С. 64-69. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії (Особистий внесок – формування завдання чисельних і експериментальних досліджень, розроблення математичної моделі ВІД, аналіз результатів, висновки).

22. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 6. С. 38-45 (Особистий внесок – розроблення математичної моделі насосного обладнання багатоповерхового будинку, чисельні дослідження, розробка заходів з підвищення енергоефективності АД у складі ЕМС).

23. Бібік О.В., Гребеніков В.В. Аналіз впливу магнітних систем на характеристики вентильно-реактивних та синхронно-реактивних двигунів. *Гідроенергетика України*. 2016. № 3. С. 47-50 (Особистий внесок – постановка чисельного експерименту, дослідження впливу геометрії магнітних систем ВІД на їх характеристики, рекомендації).

24. Бібік О.В. Вентильно-індукторний привод насосної установки багатоповерхового будинку. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2016. № 45. С. 38-45.

25. Мазуренко Л.І., Бібік О.В., Клименко В.Г., Шихненко М.О. Оцінка можливості використання вентильно-реактивного двигуна у складі верстат-гойдалки. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2017. № 1(1223). С. 97-100. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії (Особистий внесок – розроблення

математичної моделі ВІД верстат-гойдалки, дослідження за зміни періодичного навантаження, рекомендації).

26. Попович О.М., Бібік О.В. Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насосу за застосування комплексного проектування. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2018. № (5). С. 79-82. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії (Особистий внесок – рекомендації по підвищенню енергоефективності АД у складі моноблочного насоса).

27. Бібік О.В. Розроблення вентильно-індукторних двигунів на основі методики пропорційного перерахунку. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. № 52. С. 33 – 39.

28. Бібік О.В. Обґрунтування підходів до проектування асинхронних двигунів із змінним навантаженням. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2019. № 1. С. 94-98..

29. Мазуренко Л.І., Гребеніков В.В. Джура О.В., Бібік О.В., Гамалія Р.В., Шихненко М.О. Електромеханічні перетворювачі енергії для систем електрогенерації та електропривода. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2019. № 54. С. 63-74 (Особистий внесок – розроблення загальної математичної моделі ВІД з врахуванням особливостей складових системи та їх взаємного впливу і засобів по підвищенню енергоефективності та надійності електромеханічних комплексів зі змінним навантаженням).

30. Bibik O.V., Mazurenko L.I., Shykhnenko M.O. Formation of characteristics of operating modes of switched reluctance motors with periodic load. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.4, pp. 12-16 (Особистий внесок – постановка задачі, розроблення принципів керування частотою обертання ВІД з врахуванням змінного навантаження одноциліндрових поршневих компресорів, рекомендації)

31. Bibik O.V., Popovych O.M., Shurub Y.V., Golovan I.V. Efficient operating conditions of induction motors for piston compressors with frequency regulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 1. Pp. 33-39 (Особистий внесок – постановка задачі, розроблення математичної моделі і методу дослідження АД з перетворювачами частоти і періодичним навантаженням, обґрунтування розробки заходів по підвищенню їх ефективності у складі ГПК)

Продовж. дод. А

Апробація результатів дисертації

Основні положення роботи викладено та обговорено на науково-технічних конференціях:

1. Библик Е.В., Попович А.Н. Анализ и учет квазистатики при математическом моделировании асинхронных двигателей с переменным характером нагрузки: *матеріали міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах»*. (Севастополь, 20-24 вересня 2004 р. Севастополь: СевНТУ, 2004. С. 14, форма участі – публікація тез).

2. Библик Е.В., Попович А.Н., Головань И.В. Исследования квазистатических режимов асинхронного двигателя при пульсирующей и периодической нагрузках. *Технічна електродинаміка*. 2006. Ч. 2. С. 99-102. Темат. выпуск «Силовая електроніка та енергоефективність». За *матеріалами міжн. наук.-техн. конф. «Силовая електроніка і енергоефективність»* (Алушта, 2006 р., форма участі – публікація тез).

3. Мазуренко Л.І., Бібік О.В. Стан і перспективи розвитку вентильно-індукторних машин: *матеріали міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми енергозбереження в агропромисловій та природоохоронній сферах»*. (Київ, 14-15 жовтня 2010 р. Київ: НУБіП України, 2010. Вип. 153. С. 19-21, форма участі – публікація тез).

4. Библик Е.В. Анализ режимов вентильно-индукторного двигателя поршневого компрессора: *матеріали XII міжн. наук.-техн. конф. «Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах»*. (Севастополь, 23-27 вересня 2013. Севастополь: СевНТУ, 2013. С. 35-36, форма участі – публікація тез).

5. Бібік О.В., Клименко В. Г., Поліщук В.О. Вентильно-індукторний двигун з системою керування для привоу верстат-гойдалок: *матеріали VII міжн. наук.-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина»*. (Київ, 25-27 вересня 2015 р. Київ: НТТУ "КПІ", 2015. С. 63 – 64, форма участі – публікація тез).

Додаток Б

Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Київського національного університету
технологій та дизайну

« _____ » _____ 2014 р.
І.А. Ігнат'єва



АКТ

про впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
Бібік Олени Василівни «Розвиток наукових засад електромеханічних
перетворювачів енергії з періодичним навантаженням»
в навчальний процес кафедри електромеханічних систем Київського
національного університету технологій та дизайну

Комісія у складі декана факультету мехатроніки та комп'ютерних технологій к.т.н., професора Конькова Георгія Ігоровича; завідувача кафедри електромеханічних систем д.т.н., професора Злотенка Бориса Миколайовича; професора кафедри електромеханічних систем д.т.н., професора Бурмістенкова Олександра Петровича засвідчила, що результати докторської дисертаційної роботи Бібік Олени Василівни «Розвиток наукових засад електромеханічних перетворювачів енергії з періодичним навантаженням» впроваджено у навчальний процес Київського національного університету технологій та дизайну при викладанні дисциплін «Електропобутова техніка», «Теорія електроприводу», «Спеціальні електричні машини» студентам 4-5 курсів та використовуються на кафедрі для курсового і дипломного проектування за спеціальністю 7(8).05070206 – «Електропобутова техніка», що стосується питань проектування вентильно-індукторних двигунів, розробки математичних моделей і методик дослідження для електромеханічних систем на основі асинхронних і вентильно-індукторних двигунів для електропобутової техніки.

Голова комісії

Члени комісії

к.т.н., професор Коньков Г.І.

д.т.н., професор Злотенко Б.М.

д.т.н., професор Бурмістенков О.П.

Затверджую
Директор ІЕД НАНУ
академік НАНУ

О.В. Кириленко
_____ 2015 р.



Затверджую
Директор-Пр.АТ «ПВІ ЗІТ
Нафтогазбудівляція»

Ю.М. Дьомін
_____ 2015 р.



Акт використання
результатів наукових досліджень

Отримані в Інституті електродинаміки (ІЕД) НАН України під час виконання НДР «Розробка засобів покращення технічних характеристик електроенергетичного обладнання на основі оптимізації електромеханічних, електромагнітних і теплових процесів» (Об'єкт-2) результати дослідження режимів вентиляно-індукторних двигунів для систем водопостачання і верстатів-гойдалок для видобування нафти є важливим. Частота обертання вказаних двигунів регулюється шляхом зміни напруги живлення і кутів комутації напівпровідникового перетворювача. При цьому забезпечується їх енергоефективна робота в широкому діапазоні частот обертання і навантаження.

Результати досліджень щодо вентиляно-індукторних двигунів, одержаних при виконанні НДР «Розробка засобів покращення технічних характеристик електроенергетичного обладнання на основі оптимізації електромеханічних, електромагнітних і теплових процесів» планується використати при розробці нового електроприводу верстатів-гойдалок.

Зав. відділу
електромеханічних систем
ІЕД НАНУ
д-р техн. наук
 Л.І.Мазуренко

Начальник виробничого
відділу
 С.К.Прима

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. директора Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Анатолій І. АН



_____ 2020 р.

про використання в навчальному процесі результатів дисертаційної роботи
Бібік Олени Василівни на тему "Розвиток теорії та розроблення засобів підвищення
енергоефективності вентиляторно-індукторних і асинхронних двигунів
зі змінним навантаженням",
представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.09.01 "Електричні машини і апарати".

Даним актом підтверджується, що результати докторської дисертаційної роботи старшого наукового співробітника відділу №6 Інституту електродинаміки НАН України, к.т.н. Бібік Олени Василівни використовуються в навчальному процесі на кафедрі електромеханічного обладнання енергоємних виробництв Національного технічного університету України «КПІ ім. Ігоря Сікорського» при викладанні дисципліни "Енергоефективні режими електромеханічних систем". Запропоновані дисертантом математичні моделі і їх програмні реалізації також забезпечують підготовку студентами асистентських бакалаврських та магістерських робіт, пов'язаних з дослідженням і проектуванням асинхронних двигунів підвищеної ефективності для насосного і компресорного обладнання.

Завідувач кафедри електромеханічного
обладнання енергоємних виробництв
КПІ ім. Ігоря Сікорського
доктор техн. наук, проф.

Шевчук С.П.



МІНІСТЕРСТВО ПРОМИСЛОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ЕЛЕКТРОПОБУТОВИХ МАШИН "ВЕСТА"UKRAINIAN RESEARCH INSTITUTE OF HOUSEHOLD
ELECTRICAL MACHINES "VESTA"

РЕЦЕНЗІЯ

на закінчену науково-дослідну роботу "Розробити математичні моделі для дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин з урахуванням особливостей живлення та динаміки навантаження"

Асинхронні двигуни є найбільш розповсюдженим типом електромеханічних перетворювачів енергії. Це обумовлено малою вартістю, високою надійністю, технологічністю та достатньо високими енергетичними показниками. Даний рівень техніко-економічних показників досягається відпрацюваністю конструкції та застосуванням методів оптимального проектування асинхронної машини для заданих умов роботи. На практиці режим роботи часто не співпадає із номінальним, що веде до значних економічних втрат. Робота, що рецензується, присвячена розробці математичних моделей для дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин з урахуванням особливостей живлення та динаміки навантаження.

Для дослідження та проектування електромеханічного перетворювача, як складового елемента електромеханічної системи, в роботі розроблено відповідні наукові основи, методи та засоби. Зокрема, розроблено математичні моделі для дослідження та проектування електромеханічних систем на базі асинхронних машин з урахуванням особливостей експлуатаційних режимів, що є динамічними, або квазістатичними.

Значну увагу в роботі приділено підвищенню техніко-економічних показників електромеханічних систем (ЕМС) на базі асинхронних двигунів (АД) з урахуванням моменту навантажувального механізму та живлення. З цією метою розроблено методику проектування АД для роботи в складі ЕМС з підвищеною частотою живлення при наявності масивних феромагнітних елементів магнітопроводу, за результатами моделювання поля в квазірівномірній постановці; методику покращення експлуатаційних параметрів при проектуванні АД з урахуванням особливостей режимів роботи; алгоритм регулювання параметрів трифазно-однофазних асинхронних електродвигунів підвищеної ефективності за рахунок застосування фазозміщуючих модулів змінної структури.

Заслужовують уваги розрахунково-теоретичні дослідження робочих режимів АД зі змінним характером навантаження. Підтверджена адекватність математичної моделі квазістатички, розробленої в середовищі MATLAB-Simulink, на прикладі порівняльних даних розрахунку та експерименту двигуна АІВ71А2Ф2 потужністю 370 Вт, щодо поршневих компресорів типу ВС 400, ВС 800. Проведені дослідження представляють практичний інтерес для приводів з різними видами змінних навантажень, у тому числі поршневих компресорів холодильних машин, працюючих у робочому діапазоні періодичних навантажень.

Використання отриманих результатів при проектуванні електроприводу поршневих компресорів, зокрема холодильних установок, дозволить підвищити енергоефективність даних машин за рахунок узгодження характеристик АД з особливостями навантажувального механізму.

Директор УкрНДІЕМ «ВЕСТА», к.т.н.,
академік Міжнародної Академії холоду

Зав. відділом електроприводу
УкрНДІЕМ «ВЕСТА», к.т.н.



Возний В.Ф.

Примаченко Д.В.

Додаток В

Система диференціальних рівнянь електричної рівноваги АД

Математична модель для оптимального проектування АД з урахуванням динаміки навантаження представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь електричної рівноваги. Система (В.1) записана відносно симетричних складових просторових векторів струмів в системі координат, що обертається синхронно з полем, і складається з двох рівнянь:

$$\bar{u}_{1s} = r_1 \bar{i}_{1s} + \left(\frac{d}{dt} + j\omega_0 \right) \left[\left(l_{\sigma s} + \frac{3}{2} M_{ss\nu} \right) \bar{i}_{1s} + \frac{\sqrt{3}z_2}{2} M_{sr\nu} \bar{i}_{r\nu} \right]; \quad (B.1)$$

$$0 = r_r \bar{i}_{r\nu} + \left[\frac{d}{dt} + j(\omega_0 - \nu\omega_r) \right] \left[\left(l_{\sigma r} + \frac{z_2}{2} M_{rr\nu} \right) \bar{i}_{r\nu} + \frac{\sqrt{3}z_2}{2} M_{rs\nu} \bar{i}_{1s} \right],$$

де r_1 - опір фази статора; ω_0 - кутова частота обертання поля; ν - порядок робочої просторової гармоніки магнітного поля; z_2 - число зубців ротора АД; $M_{ij\nu}(i, j = s, r)$ - взаємна індуктивність двох електричних контурів (статора – s і ротора – r) при умові співпадіння їх осей; l_{σ} - індуктивність розсіювання; $\bar{u}_{1s}, \bar{i}_{1s}$ - перші симетричні складові трифазної системи напруг і струмів фаз статора; $\bar{i}_{r\nu}$ - ν -я симетрична складова z_2 -фазної системи струмів короткозамкненого ротора в контурах, що утворено сусідніми стрижнями і ділянками кілець.

В сталому режимі напруга й струми системи (В.1) пропорційні часовим комплексам діючих значень напруги ($\dot{U}_s$), струму ($\dot{I}_s$) трифазного статора і струму ($\dot{I}_r$) z_2 -фазного ротора:

$$\bar{u}_{1s} = \sqrt{3/2} \dot{U}_s, \quad \bar{i}_{1s} = \sqrt{3/2} \dot{I}_s, \quad \bar{i}_{vr} = \sqrt{z_2/2} \dot{I}_r \quad (\text{B.2}).$$

Параметри системи (В.1) розраховуються за допомогою виразів [46, 140]:

$$r_r = 2[r_{yk} + r_c(1 - \cos 2\pi\nu / z_2)], \quad l_{\sigma r} = 2[m_l + m_n(1 - \cos 2\pi\nu / z_2)], \quad (\text{B.3})$$

$$M_{ij\nu} = \frac{\mu_0}{\delta k_{\delta} k_{\mu\nu}} l_{\delta} R \pi k_{cij\nu} f_{i\nu} f_{j\nu},$$

де r_{yk}, r_c - активні опори ділянки короткозамкненого кільця і стрижня ротора; m_l - власна індуктивність роторного контура по потоку розсіювання, який викликано струмом на ділянці короткозамкненого кільця, m_n - власна взаємна індуктивність роторних контурів по потоку розсіювання, що викликаний струмом в стрижні; μ_0 - магнітна стала; δ - величина повітряного проміжку; K_{δ} - коефіцієнт Картера; $k_{\mu\nu}$ - коефіцієнт насичення магнітного кола; R, l_{δ} - радіус розточки й довжина пакету статора; $k_{cij\nu}$ - коефіцієнт скосу контурів i та j ; f - МРС фази при одиничному струмі:

$$f_{rv} = \frac{2}{\nu\pi} k_{yr\nu}; \quad f_{sv} = \frac{2}{\nu\pi} w_1 k_{o\delta\nu}, \quad (\text{B.4})$$

де $k_{yr\nu} = \sin \nu\pi / z_2$ - коефіцієнт скорочення контура ротора; $w_1, k_{o\delta\nu}$ - кількість витків і обмотковий коефіцієнт фази статора.

Параметри системи (В.1) можуть бути визначені також, виходячи з параметрів заступної схеми двигунів [46]. Для цього, система (В.1) за допомогою виразів (В.2) перетворюється в рівняння сталого режиму, здійснюється зведення z_2 - фазного ротора до трифазного. Вданому випадку параметри розраховуються наступним чином:

$$l_{\sigma s} = x_1 / \omega_0; \quad M_{ssv} = \frac{2}{3} x_{mv} / \omega_0;$$

$$M_{srv} = M_{rsv} = \frac{k_{yrv}}{k_{o\delta v} w_1} \frac{2}{3} x_{mv} / \omega_0; \quad r_r = \left(\frac{k_{yrv}}{k_{o\delta v} w_1} \right)^2 \frac{z_2}{3} r'_2; \quad (\text{B.5})$$

$$M_{rrv} = \left(\frac{k_{yrv}}{k_{o\delta v} w_1} \right)^2 \frac{2}{3} x_{mv} / \omega_0; \quad l_{\sigma r} = \left(\frac{k_{yrv}}{k_{o\delta v} w_1} \right)^2 \frac{z_2}{3} x'_{2v} / \omega_0;$$

де $x_{mv}, x'_{2v}, r'_2, r_1, x_1$ – параметри Т-подібної заступної схеми.

Додаток Г

Залежності напору і ККД відцентрового насосу K20/30 у функції подачі і частоти обертання

Для розрахунку характеристик відцентрового насосу за зміни частоти обертання ротора скористаємось результатами роботи [204], де аналітично визначено залежності напору і ККД насосу у функції подачі і частоти обертання, спираючись на каталогову інформацію, положення теорії подібності насосів, класичні припущення про розподіл втрат потужності у насосі. Ці втрати пов'язані з наступними факторами: втратами напору внаслідок гідравлічного тертя у проточній частині (пропорційні квадрату подачі) та виникнення вихореутворення гідравлічного удару (пропорційні квадрату відхилення подачі від номінальної); механічними втратами у підшипниках (пропорційні частоті обертання ротора) та дисковим тертям рідини поза межами проточної частини (пропорційні кубу частоті обертання ротора); об'ємними втратами (пропорційні напору у степені 1,5). Дані аналітичні залежності характеристик насосу [204], крім каталогу, спираються на інформацію щодо максимуму ККД насосу при деякій неномінальній частоті обертання ротора.

У проведених дослідженнях [27], спираючись на закономірності зміни характеристик насосу за подачею та частоти обертання ротора АД, отримано і застосовано дещо спрощену апроксимацію ККД із додатковим застосуванням ряду загальноприйнятих припущень: залежність ККД від подачі симетрична відносно лінії номінальної подачі, що відповідає максимуму ККД; ККД залежить від подачі у степені 2.3 [108]; із використанням закономірностей теорії подібності, подача за максимуму ККД змінюється пропорційно частоті обертання; максимальне значення ККД насоса має місце при номінальній величині частоти обертання двигуна; залежності зміни максимуму ККД із частотою обертання ротора відповідають закономірностям [204] і визначаються за інформацією про максимуми ККД насосу

при їх неномінальних значеннях. З урахуванням викладеного, залежності напору насосу (H) і ККД (η) від подачі (Q) і частоти обертання ротора (n) мають вигляд:

$$H = H_0(n/n_H)^2 + AQn/n_H - BQ^2; \quad (\Gamma.1)$$

$$\eta = \eta_m \left(1 - \left| \frac{Q \cdot n_H}{Q_H \cdot n} - 1 \right|^{2.3} \right) \begin{cases} \eta_m = \eta_H \left[1 - \left(\frac{n}{n_H} - 1 \right)^{2m} \right], n \leq n_H \\ \eta_m = \eta_H \left[1 - \frac{\eta_H - \eta''}{(n'' - n_H)^2} (n - n_H)^2 \right], n \geq n_H \end{cases}, \quad (\Gamma.2)$$

де константи

$$A = \frac{(H' - H_0)Q''^2 - (H'' - H_0)Q'^2}{Q'Q''(Q'' - Q')}; \quad B = \frac{(H' - H_0)Q'' - (H'' - H_0)Q'}{Q'Q''(Q'' - Q')}$$

$m = \ln(1 - \eta'/\eta_H) / \ln(n'/n_H - 1)^2$; H_0 – величина напору при нульовій подачі; Q_H, η_H, n_H – номінальні подача, ККД, частота обертання; $(Q'; H')$, $(Q''; H'')$ – координати початку та кінця робочої ділянки (за рівнем ККД: $\eta \geq (0.9 \dots 0.95)\eta_H$) напірної характеристики; η', η'' – величини максимумів ККД насоса при частотах обертання n', n'' , меншій та більшій за номінальну відповідно.

Згідно формул (Г.1) і (Г.2) розраховано залежності напору і ККД відцентрового насосу К 20/30 від подачі і частоти його обертання [27] з трифазним асинхронним двигуном потужністю 3кВт з номінальною лінійною напругою живлення $U = 380$ В. Приклад апроксимації характеристик насоса К-20/30 за наведеними виразами показано на рис. Г.1 для швидкостей 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 об/хв.

Крива залежності $\eta = f(Q)$ крайня ліворуч відповідає частоті обертання 1000 об/хв., крайня справа – 5000 об/хв. Верхня крива залежності $H = f(Q)$ відповідає частоті обертання 5000 об/хв., нижня – 1000 об/хв.

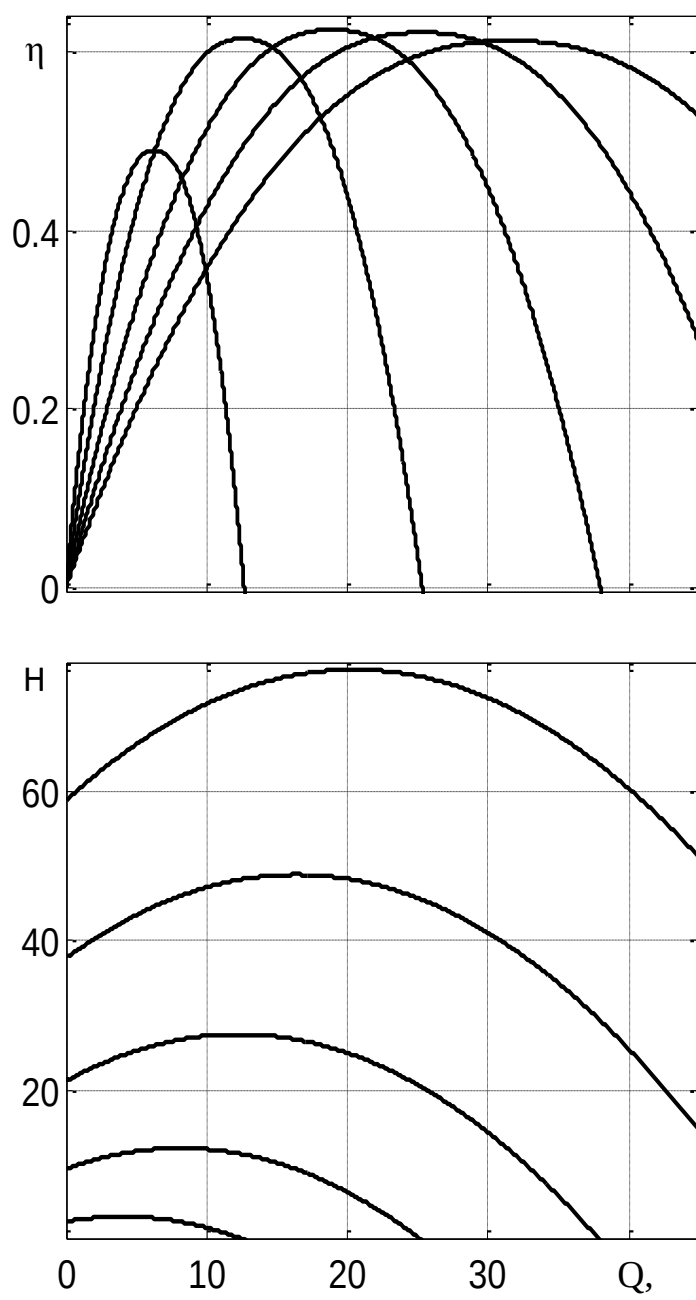


Рис. Г.1

Додаток Д

Математична модель моноблочного насоса

Імітаційна модель моноблочного насоса складається з блоків системи живлення і вимірювача її параметрів, імітаційних блоків вивідних кінців фаз АД (n1-k1, n2-k2) та підключеного паралельно до його входу блоку урахування втрат у сталі та додаткових (st_par), а також конденсаторів. Для розрахунку величин електромагнітних параметрів, струмів та моментів двигуна, його робочих характеристик використовуються блоки структурного моделювання, відповідно: Param, AD, RabXar.

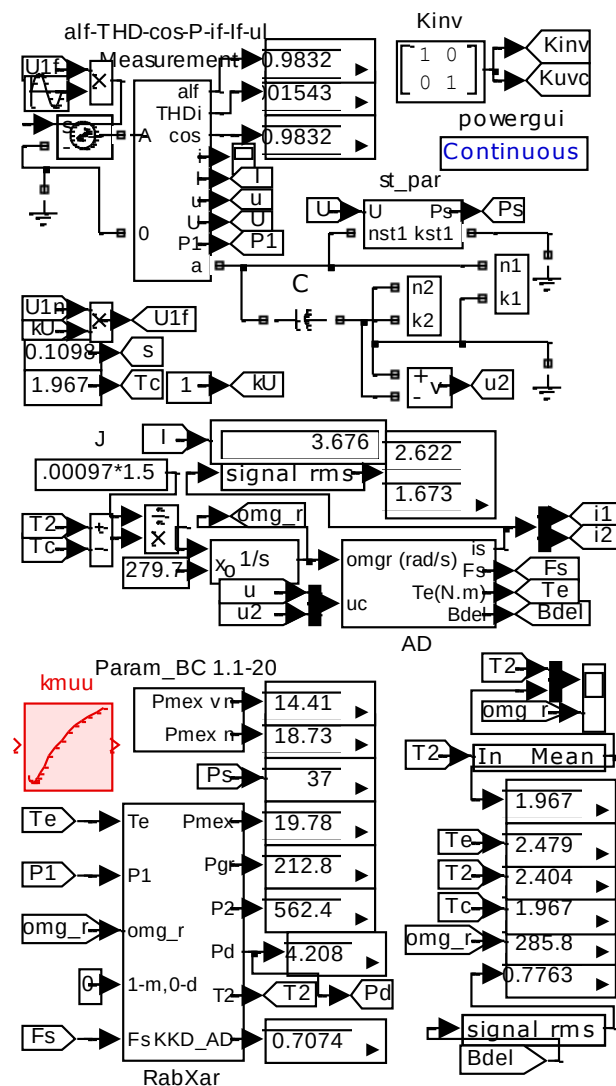


Рис. Д1. Імітаційна модель насоса

На дисплеях рис. Д1 наведено деякі результати розрахунку. У нижній частині рисунку, лівий стовпчик, відповідно: вентиляційні і повні механічні втрати [166], втрати у сталі, механічні втрати [27], гріючі втрати, корисна потужність, додаткові втрати, ККД АД. Правий стовпчик, відповідно: середнє значення корисного моменту АД, електромагнітний момент, корисний момент, момент опору на валу, миттєве значення частоти обертання ротора, середньоквадратичне значення індукції у повітряному проміжку. У верхній частині рисунку: коефіцієнт потужності, THD_i , косинус за першою гармонікою. Результат розрахунку статичної механічної характеристики наведено на рис. Д.2

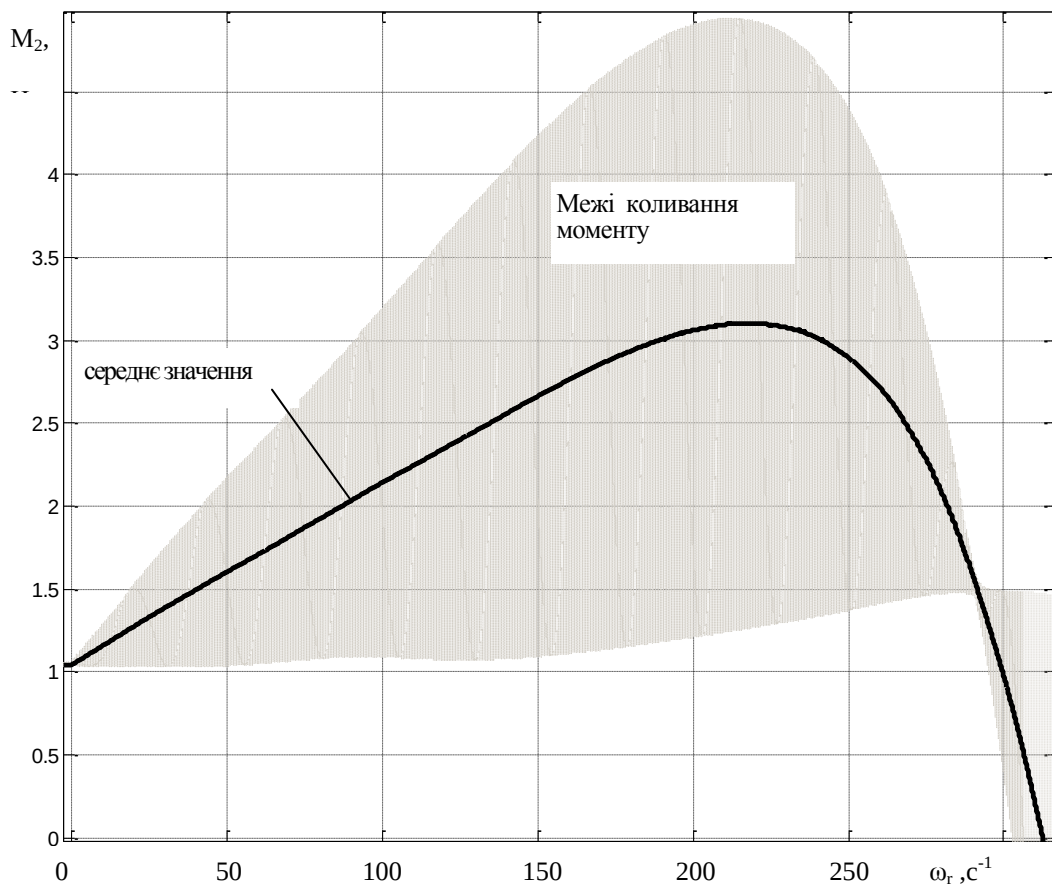


Рис.Д2. Розрахункова механічна характеристика

Математична модель АД за величинами напруги і частоти джерела живлення, а також частоти обертання дозволяє визначити величини електромагнітного моменту, корисної потужності і втрат АД. В залежності від співвідношення електромагнітного моменту АД і моментів опору на валу і механічних втрат у АД,

розраховується залежність зміни швидкості, яка впливає на характеристики двигуна. Перехідний процес закінчується із визначенням усталеного режиму, коли моменти рухомий та опору на валу стають рівними. У процесі розрахунку за величинами моментів (електромагнітного та власного опору АД) коригуються корисна потужність АД і втрати у його підшипниках. За результатами розрахунку режиму роботи визначається величина індукції у повітряному проміжку АД, яка є вхідною величиною для визначення втрат у сталі. Також, визначається величина сумарної МРС машини для визначення коефіцієнта насичення магнітного кола за основним полем (за заздалегідь розрахованими залежностями), що дозволяє розрахувати величину відповідних індуктивних параметрів.

Розрахунок втрат у сталі при моделюванні режимів роботи аналогічний [27]. Разом з втратами у сталі враховано додаткові втрати у АД, які прийнято як 0,5 % від номінальної спожитої потужності із коригуванням пропорційно співвідношенню квадратів модуля МРС статора режиму, який досліджується, і номінального. Урахування співвідношення МРС замість струмів забезпечує дослідження із зміною схем обмотки статора.

Механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за трьома складовими: тертям у підшипниках, втратами у вентиляційному вузлі зовнішнього обдуву та аеродинамічними втратами всередині машини. У формулах визначення втрат на вентиляцію використана функціональна залежність від розмірів вентилятора та частоти обертання у третьому ступені [10, 27]. Втрати у підшипниках визначено в залежності від ваги ротора.

Додаток Е

Розрахунок втрат в сталі з урахуванням особливостей конструкції ВІД,
режимів і зміни параметрів магнітного поля

На основі методики (п. 3.3.4 Розділ 3) проведено розрахунок і зроблено оцінку втрат в сталі для зразка ВІД, який розроблено на основі серійного двигуна 4АА56УЗ ($P_n=120$ Вт) при незмінних зовнішньому і внутрішньому діаметрах на номінальній потужності і частоту обертання.

За результатами дослідження протікання електромагнітних процесів в магнітопроводі ВІД визначено закономірності зміни магнітного потоку зубцях і ярмах статора і ротора. Так при швидкості обертання ротора 1500 об/хв., ділянці ярма статора (ділянка між зубцями статора) буде відповідати форма зміни потоку з частотою 100 Гц. Часова залежність зміни індукції для ділянки ярма статора зображена на рис. Е.1. Форми зміни потоку в зубцях статора і ротора з частотами 100 і 150 Гц відповідно представлені на рис. Е.2 і рис. Е.3.

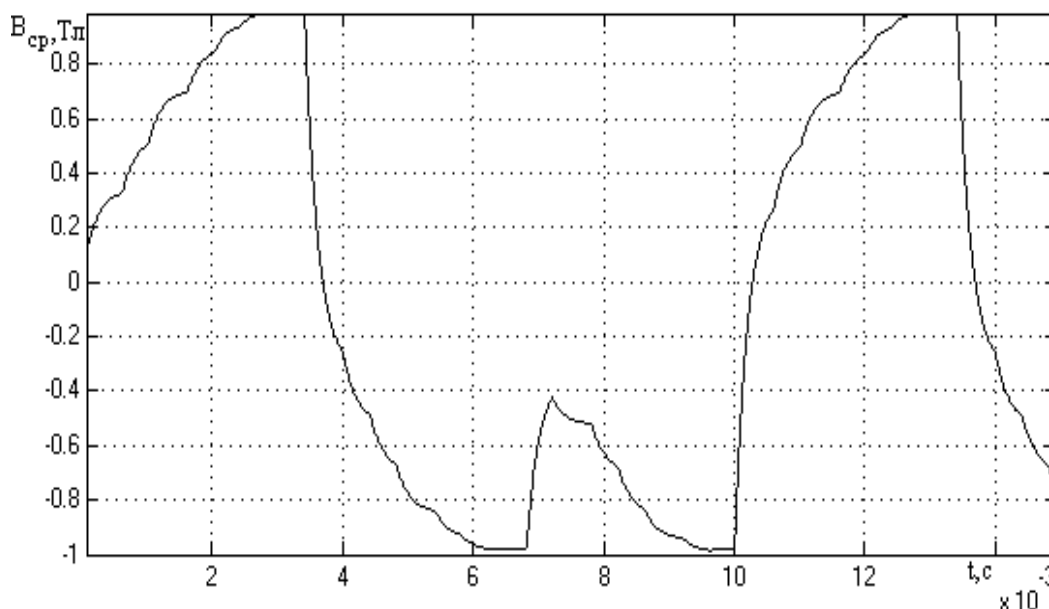


Рис. Е.1

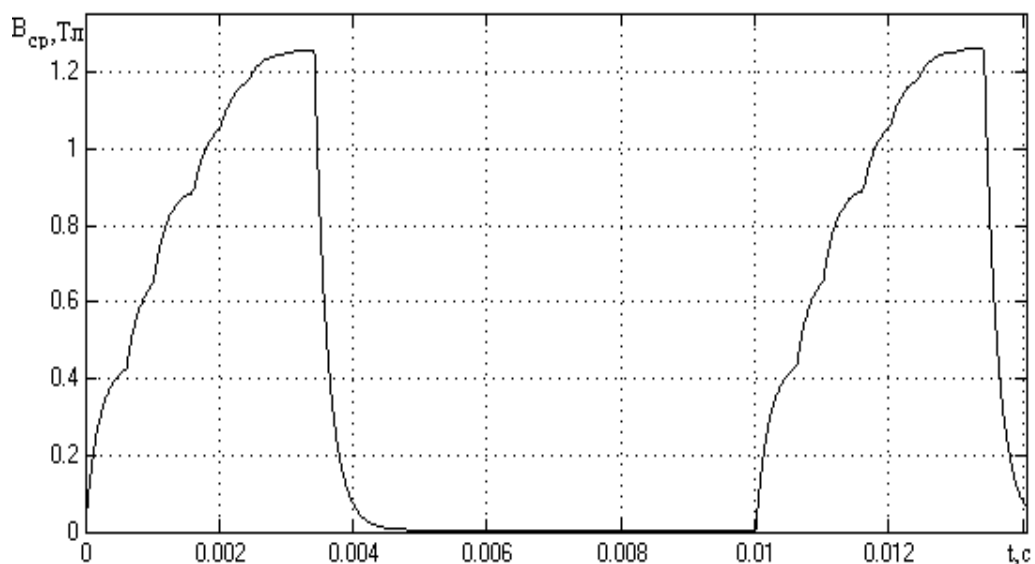


Рис. Е.2

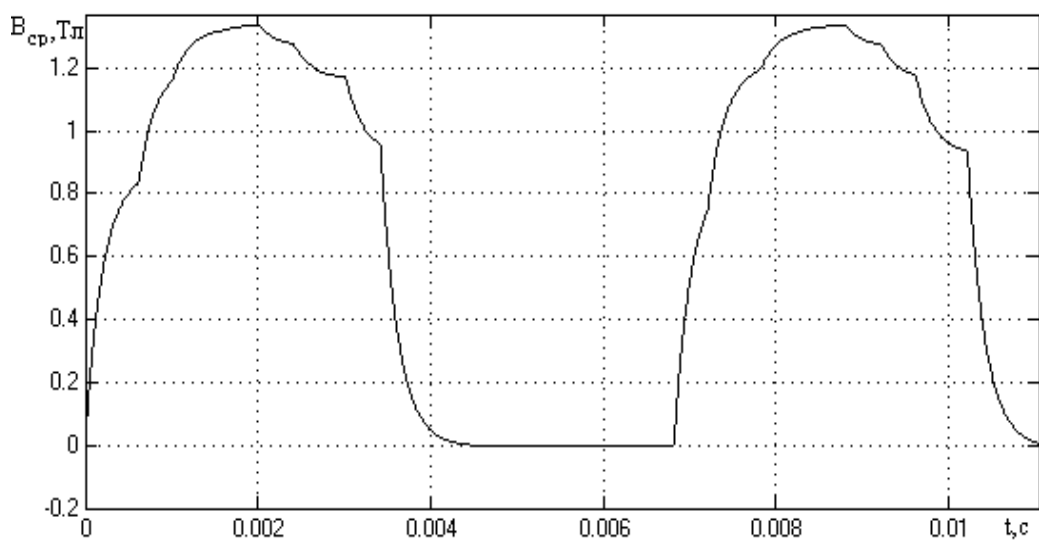


Рис. Е.3

З метою підвищення точності розрахунку втрат ділянки магнітопроводу додатково поділяються на елементи з наближеним до рівномірного розподілу в них індукції. Розрахункова схема ВІД з розподілом векторного магнітного потенціалу зображена на рис. Е.4. Втрати в елементі під номером 12 не враховано через незначний рівень насичення.

Розраховані величини середніх індукцій у відповідних елементах магнітопроводів при різних кутах повороту ротора ВІД, геометрія якого відповідає рис. Е.4, зведені у табл. Е.1.

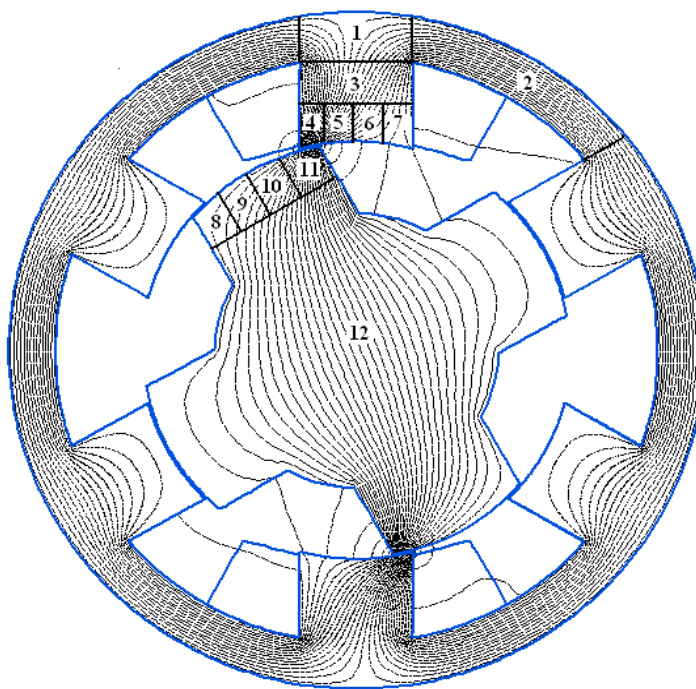


Рис. Е.4

Таблиця Е.1

Значення середніх індукцій у ділянках ВІД для різних кутів повороту ротора

№ елементу	V, м ³	θ , град						
		0	5	10	15	20	25	30
1	6.98e-6	0.52	0.52	0.49	0.44	0.35	0.26	0.15
2	1.38e-5	1.46	1.48	1.41	0.28	1.05	0.79	0.50
3	9.12e-6	1.25	1.4	1.18	1.07	0.89	0.68	0.44
4	1.0e-6	1.27	1.28	1.35	1.45	1.48	1.44	1.18
5	8.6e-7	1.21	1.22	1.29	1.38	1.36	1.08	0.59
6	8.63e-7	1.21	1.21	1.22	1.17	0.86	0.49	0.24
7	1.0e-6	1.27	1.24	0.89	0.55	0.33	0.20	0.15
8	1.6e-6	0.92	0.70	0.53	0.38	0.23	0.15	0.09
9	1.91e-6	1.08	1.09	1.02	0.84	0.57	0.34	0.20
10	1.91e-6	1.08	1.13	1.22	1.24	1.05	0.73	0.38
11	1.6e-6	0.93	1.15	1.26	1.33	1.32	1.21	0.87

При розв'язанні диференціальних рівнянь (3.31 – 3.33) визначено часові залежності зміни напруженості магнітного поля на поверхні листа $H_1 = f(t)$ і зміни

значень середньої в просторі індукції в листі $B_{cp} = f(H_1)$ для ділянок ярем статора, зубців статора та ротора (Рис. Е.5.– Е.7). Це дозволило визначити відповідні питомі втрати активної потужності внаслідок впливу вихрових струмів за допомогою чисельного підрахунку величини інтегралу (Рис. Е.8 – Е.11).

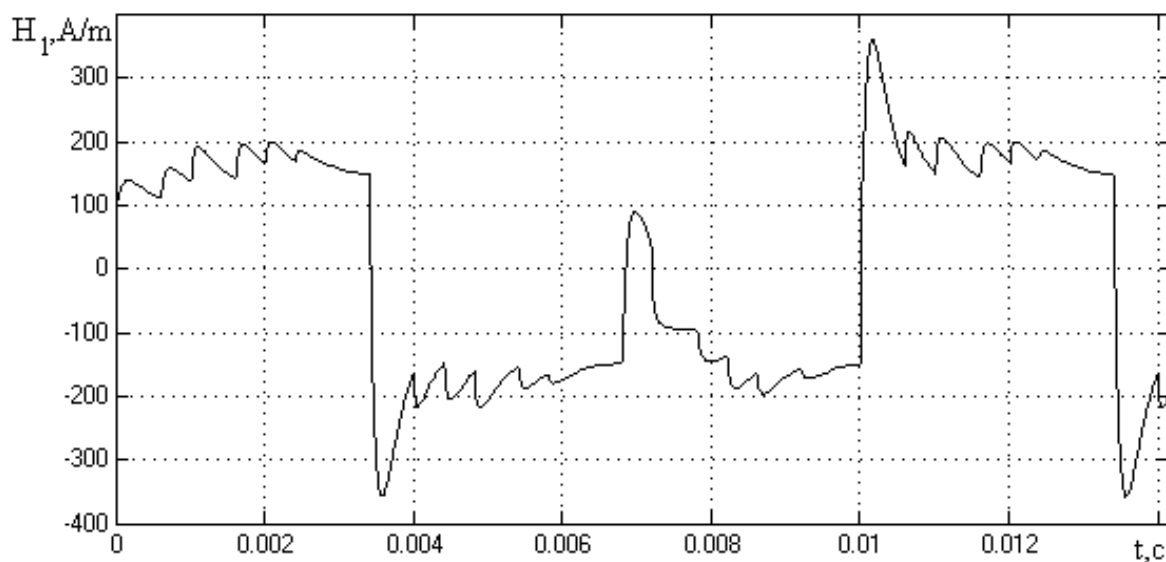


Рис. Е.5 Часова залежність зміни напруженості магнітного поля для ділянки ярма статора

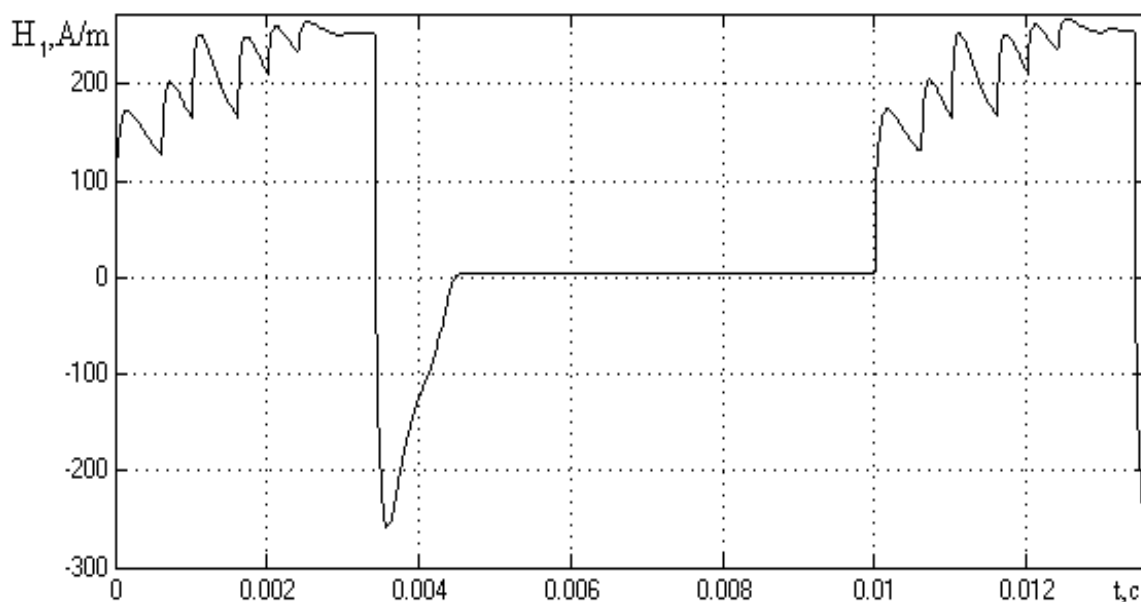


Рис. Е.6 Часова залежність зміни напруженості магнітного поля для ділянки зубця статора

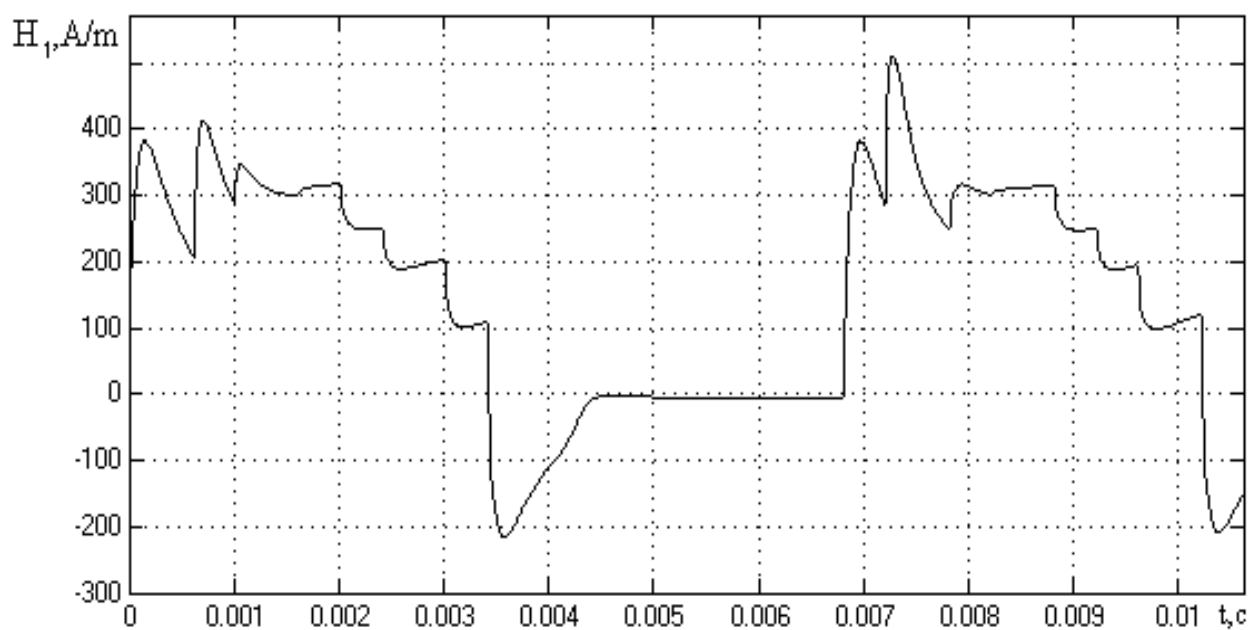


Рис. Е.7 Часова залежність зміни напруженості магнітного поля для ділянки зубця ротора

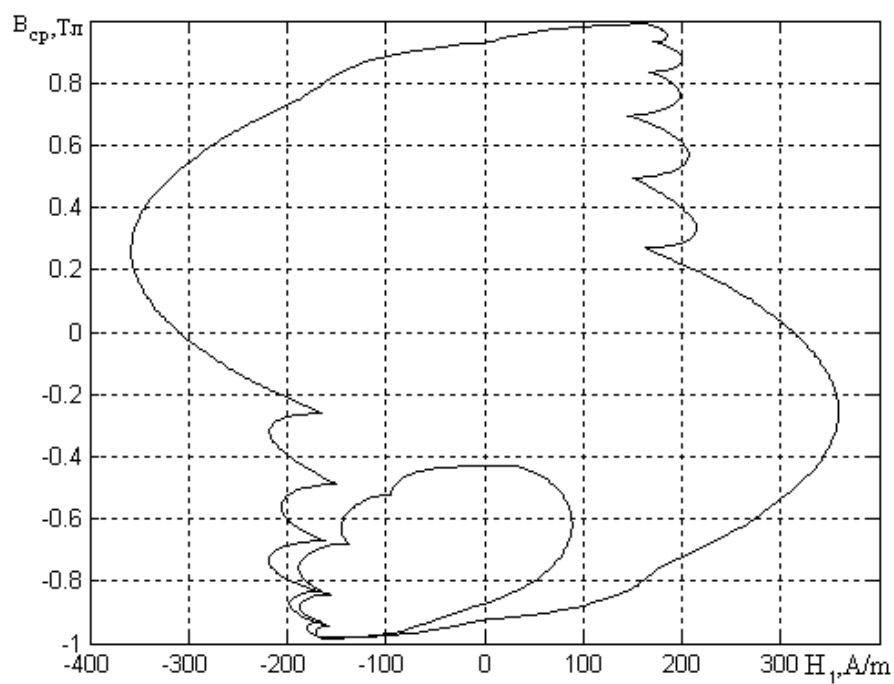


Рис. Е.8 Залежність $B_{cp} = f(H_1)$ для ділянки ярма статора

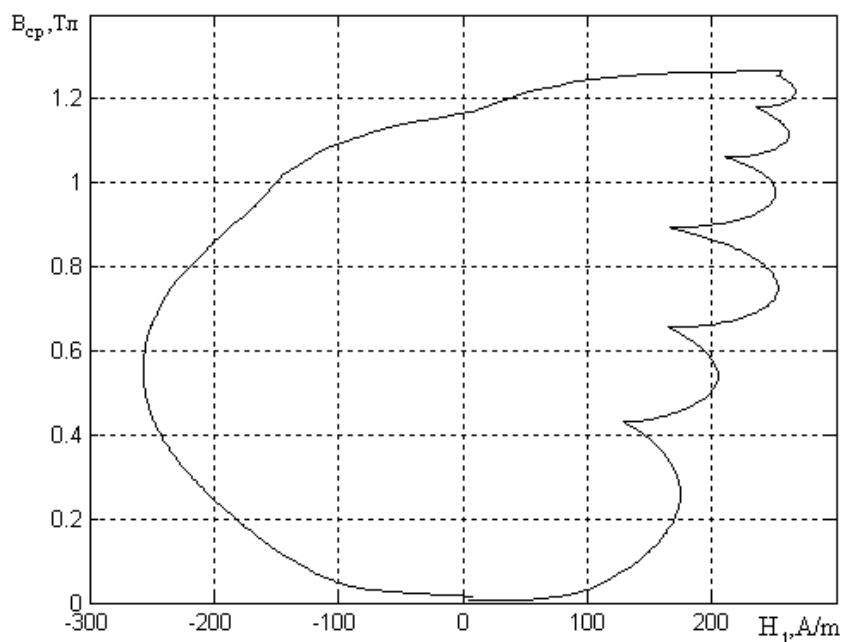


Рис. Е.9 Залежність $B_{cp} = f(H_1)$ для ділянки зубця статора

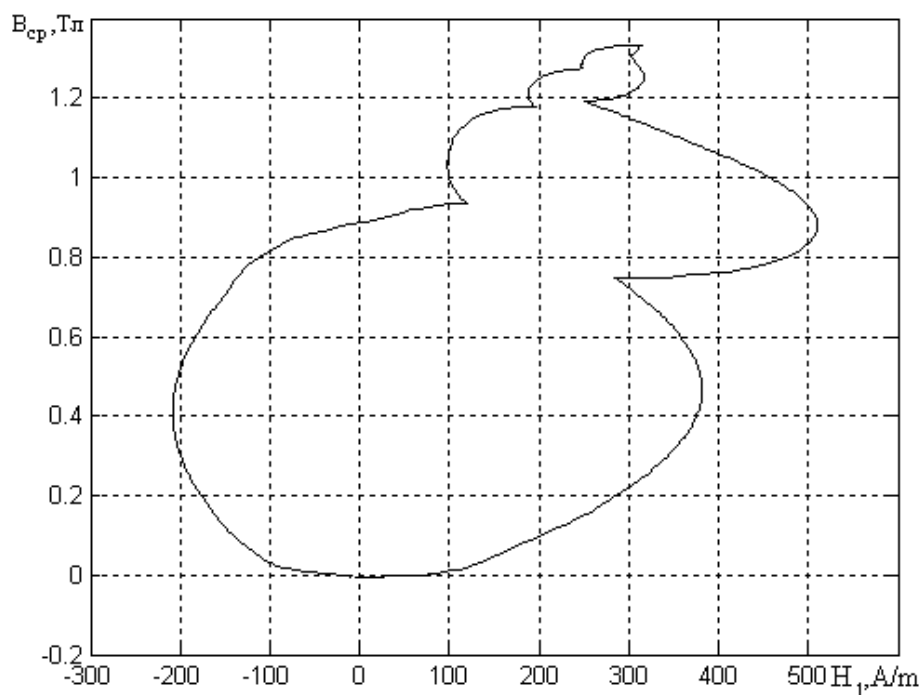


Рис. Е.10 Залежність $B_{cp} = f(H_1)$ для ділянки зубця ротора

Помноживши отримані втрати на об'єм та кількість зубців та ділянок ярем статора отримано сумарні втрати від вихрових струмів в сталі магнітопроводу ВІД, що становлять $\sum P_g = 27,37$ Вт, та втрати на гістерезис $\sum P_z = 4,3$ Вт (Табл. Е.2).

При використанні даного методу слід звернути увагу на вибір кількості вузлів сітки, від якого залежить точність розрахунку часового розподілу характеристик поля. Так при поділі половини листа товщиною в 0.25^{-3} м на 10 шарів, в результаті розрахунку поля отримаємо зміщення, по вісі ординат, часового розподілу характеристик поля на деяку постійну. Таке поступове зміщення характеристик до усталеного процесу пов'язане з вибором великого кроку розв'язку диференційного рівняння (п. 3.3.4 Розділ 3). В результаті зменшення кроку розв'язку диференційного рівняння, а саме збільшення кількості вузлів сітки до 30 досягається підвищення точності розрахунку. Тому саме на таку кількість шарів був розбитий лист, який досліджується.

Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування визначаються площею петлі гістерезису за результатами чисельного розрахунку величини інтегралу:

$$P_{\text{гит}} = f \oint H_{\text{cp}} dB_{\text{cp}} . \quad (\text{E.1})$$

В табл. E.2 наведено результати таких розрахунків для кожного елементу.

Таблиця E.2

Результати розрахунків втрат в сталі магнітопроводу ВІД

Втрати	Номер елементу										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$P_{\text{г}}, \text{Вт}$	0.18	3.47	0.41	0.085	0.048	0.044	0.055	0.07	0.1	0.12	0.126
$P_{\text{ст}}, \text{Вт}$	0.12	0.18	0.15	0.02	0.016	0.014	0.016	0.044	0.06	0.07	0.065

Втрати на гістерезис за виразом (E.1) визначаються в кожному окремому шарі листа з наступним знаходженням середнього їх значення. Помноживши отримані втрати на об'єм та кількість зубців і ділянок ярма статора отримаємо сумарні втрати на гістерезис в сталі магнітопроводу ВІД, що становлять $P_{\text{г}}=4,3\text{Вт}$. Сумарні втрати в сталі ВІД дорівнюють $P_{\text{ст}}= 31,4 \text{ Вт}$.

Додаток Ж

Технічні показники та критерії інтенсивних квазісталих режимів трифазних АД

Таблиця Ж1

Двополюсні АД (синхронна частота обертання 3000 об/хв.)

Тип двигуна	Параметри							
	P_H , Вт	s_H , %	M_H , Н·м	K_M , в.о.	J_P , кг·м ²	T_E , с	T_{MK} , с	$k_{кр}$ в.о.
4AA50A2Y3	90	8,6	0,314	2,2	0,000025	$6,37 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$	0,53
4AA50B2Y3	120	9,7	0,423	2,2	0,000028	$6,24 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	0,46
4AA56A2Y3	180	8,0	0,623	2,2	0,00042	$6,92 \cdot 10^{-3}$	$26,5 \cdot 10^{-3}$	3,80
4AA56B2Y3	250	7,5	0,8607	2,2	0,00047	$6,24 \cdot 10^{-3}$	$23,8 \cdot 10^{-3}$	3,82
4AA63A2Y3	370	8,3	1,285	2,2	0,00076	$6,306 \cdot 10^{-3}$	$25,6 \cdot 10^{-3}$	4,06
4AA63B2Y3	550	8,5	1,914	2,2	0,0009	$5,843 \cdot 10^{-3}$	$21,95 \cdot 10^{-3}$	3,76
4A71A2Y3	750	5,9	2,538	2,2	0,00097	$8,38 \cdot 10^{-3}$	$12,4 \cdot 10^{-3}$	1,49
4A71B2Y3	1100	6,3	3,74	2,2	0,0011	$8,166 \cdot 10^{-3}$	$10,15 \cdot 10^{-3}$	1,20
4A80A2Y3	1500	4,2	4,99	2,6	0,0018	$8,98 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	2,68
4A80B2Y3	2200	4,3	7,32	2,6	0,0021	$8,38 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	0,94
4A90L2Y3	3000	4,3	9,98	2,5	0,0035	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,87
4A100S2Y3	4000	3,3	13,17	2,5	0,0059	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$9,45 \cdot 10^{-3}$	0,84
4A100L2Y3	5500	3,4	17,95	2,5	0,0075	$1,098 \cdot 10^{-2}$	$9,13 \cdot 10^{-3}$	0,83
4A112M2Y3	7500	2,5	24,495	2,8	0,010	$1,873 \cdot 10^{-2}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$	0,25
4A132M2Y3	11000	2,7	35,856	2,8	0,023	$1,676 \cdot 10^{-2}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	0,489

Таблиця Ж2

Чотириполюсні АД (синхронна частота обертання 1500 об/хв.)

№ п/п	Тип двигуна	Параметри							
		P_H , Вт	s_H , %	M_H , Н·м	K_M , в.о.	J_P , кг·м ²	T_E , с	T_{MK} , с	$k_{кр}$ в.о.
1	4AA50A4Y3	60	8,1	0,416	2,2	0,000029	$5,44 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$	0,32
2	4AA50B4Y3	90	8,6	0,627	2,2	0,000033	$5,38 \cdot 10^{-3}$	$1,33 \cdot 10^{-3}$	0,25
3	4AA56A4Y3	120	8,2	0,833	2,2	0,00070	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$17,6 \cdot 10^{-3}$	2,71
4	4AA56B4Y3	180	8,9	1,258	2,2	0,00079	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$12 \cdot 10^{-3}$	1,90
5	4AA63A4Y3	250	8,0	1,73	2,2	0,0012	$6,64 \cdot 10^{-3}$	$14,2 \cdot 10^{-3}$	1,79
6	4AA63B4Y3	370	9,0	2,59	2,2	0,0014	$6,63 \cdot 10^{-3}$	$11,1 \cdot 10^{-3}$	1,68
7	4A71A4Y3	550	7,8	3,8	2,2	0,0013	$8,16 \cdot 10^{-3}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	0,70
8	4A71B4Y3	750	7,5	5,16	2,2	0,0014	$7,96 \cdot 10^{-3}$	$4,64 \cdot 10^{-3}$	0,58
9	4A80A4Y3	1100	5,4	7,406	2,2	0,0032	$9,23 \cdot 10^{-3}$	$6,29 \cdot 10^{-3}$	0,68

Продовж. Табл. Ж2									
10	4A80B4Y3	1500	5,8	10,14	2,0	0,0033	$9,23 \cdot 10^{-3}$	$5,28 \cdot 10^{-3}$	0,57
11	4A90L4Y3	2200	5,4	14,81	2,4	0,0056	$9,65 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	0,51
12	4A100S4Y3	3000	4,4	19,987	2,4	0,0087	$1,027 \cdot 10^{-2}$	$5,28 \cdot 10^{-3}$	0,51
13	4A100L4Y3	4000	4,6	26,706	2,4	0,011	$1,01 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	0,50
14	4A112M4Y3	5500	3,6	36,34	2,2	0,017	$1,27 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,39
15	4A132S4Y3	7500	2,9	49,197	3,0	0,028	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$3,48 \cdot 10^{-3}$	0,21
16	4A132M4Y3	11000	2,8	80,348	3,0	0,04	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$3,05 \cdot 10^{-3}$	0,19

Таблиця Ж3

Шестиполюсні АД (синхронна частота обертання 1000 об/хв.)

№ п/п	Тип двигуна	Параметри							
		P_H , Вт	s_H , %	M_H , Н·м	K_M , в.о.	J_p , кг·м ²	T_E , с	T_{MK} , с	$k_{кр}$ в.о.
1	4AA63A6Y3	180	11,5	1,943	2,2	0,0018	$5,74 \cdot 10^{-3}$	$14,6 \cdot 10^{-3}$	2,54
2	4AA63B6Y3	250	10,8	2,678	2,2	0,0022	$5,095 \cdot 10^{-3}$	$14,6 \cdot 10^{-3}$	2,88
3	4A71A6Y3	370	9,2	3,89	2,2	0,0017	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$6,12 \cdot 10^{-3}$	0,94
4	4A71B6Y3	550	10,0	5,84	2,2	0,0020	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	0,74
5	4A80A6Y3	750	8,4	7,8	2,2	0,0031	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,49
6	4A80B6Y3	1100	8,0	11,42	2,2	0,0046	$8,38 \cdot 10^{-3}$	$4,37 \cdot 10^{-3}$	0,52
7	4A90L6Y3	1500	6,4	15,31	2,2	0,0073	$1,027 \cdot 10^{-2}$	$4,22 \cdot 10^{-3}$	0,41
8	4A100L6Y3	2200	5,4	22,22	2,2	0,013	$1,25 \cdot 10^{-2}$	$4,26 \cdot 10^{-3}$	0,34
9	4A112MA6Y3	3000	4,7	30,08	2,5	0,017	$8,6 \cdot 10^{-3}$	$5,26 \cdot 10^{-3}$	0,61
10	4A112MB6Y3	4000	5,1	40,27	2,5	0,021	$8,38 \cdot 10^{-3}$	$4,98 \cdot 10^{-3}$	0,59
11	4A132S6Y3	5500	3,8	50,55	2,5	0,04	$8,85 \cdot 10^{-3}$	$7,15 \cdot 10^{-3}$	0,81
12	4A132MB6Y3	7500	3,2	74,02	2,5	0,058	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	0,42
13	4A160S6Y3	11000	2,7	108,57	2,0	0,14	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$6,1 \cdot 10^{-3}$	0,29
14	4A160M6Y3	15000	2,6	147,13	2,0	0,18	$2,27 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	0,185
15	4A180M6Y3	18500	2,4	181,09	2,0	0,22	$2,34 \cdot 10^{-2}$	$5,16 \cdot 10^{-3}$	0,22

Додаток И

Таблиця И.1

Розрахунки квазісталих режимів АД з перетворювачем частоти у складі ГПК

Максимум залежності $M_c = f(\theta)$	f	U	$\omega_{rcp} = \omega_{rc}$	$\delta\omega_r$	$M_{2cp} = M_{2c}$	ΔM	$\eta_{кв}$	η_c	$\Delta\eta$	$P_t(\theta)$	B_δ
$H \cdot м$	Гц	В	с ⁻¹	%	$H \cdot м$	%	%	%	%	Вт	Тл
2	50	220	305,5	1,9	0,688	18	68,7	68,71	0,01	83,37	0,711
	40	186,1	243,5	3,08	0,6883	29,4	64,55	64,62	0,07	85,19	0,745
	30	147,1	181,4	5,51	0,6893	47,1	57,91	58,09	0,18	87,4	0,774
	25	125,7	150,2	8,26	0,6909	61,8	53,49	53,86	0,37	87,59	0,784
	23	116,8	137,7	9,86	0,6921	71,04	51,56	52	0,44	87,2	0,786
	20	103,1	118,8	13,3	0,6949	87	48,44	49,12	0,68	85,82	0,788
	18	93,68	106,3	16,9	0,6986	102,4	46,16	47,17	1,01	84,16	0,786
	15	79,2	87,1	25,3	0,7092	131,4	42,52	44,39	1,87	80,39	0,778
3	50	220	300,9	2,92	1,032	17,44	73,59	73,64	0,05	99,5	0,698
	40	186,1	239,4	4,68	1,033	27,21	70,22	70,34	0,12	98,23	0,731
	30	147,1	177,4	8,7	1,035	45,25	64,6	64,9	0,3	97,3	0,756
	25	125,7	146,2	13	1,039	60,9	60,57	61,2	0,63	96,2	0,762
	23	116,8	133,6	15,67	1,041	69,41	58,7	59,55	0,85	95,5	0,763
	20	103,1	114,7	21,5	1,049	85,6	55,4	56,85	1,45	94,08	0,761
	18	93,68	102,1	27,47	1,058	99,56	52,8	54,92	2,12	93,01	0,756
	15	79,2	82,25	42,5	1,085	129,1	47,58	51,74	4,16	93,04	0,74
4	50	220	296	4,03	1,376	17,05	74,92	74,99	0,07	124,9	0,685
	40	186,1	234,8	6,48	1,378	26,59	71,88	72,04	0,16	120,2	0,715
	30	147,1	173	12,18	1,382	44,14	66,56	67,06	0,5	116,6	0,736
	25	125,7	141,6	18,43	1,388	59,38	62,47	63,48	1,01	115,2	0,739
	23	116,8	128,9	22,37	1,394	67,59	60,39	61,76	1,37	114,9	0,737
	20	103,1	109,4	31,25	1,406	83,86	56,4	58,76	2,36	115,6	0,73
	18	93,68	96,1	40,65	1,426	98,69	52,7	56,32	3,62	118,3	0,721
	15	79,2	75,78	75,59	1,49	155,1	41,58	51,05	9,47	143,2	0,685
5	50	220	290,7	5,217	1,721	16,68	74,41	74,49	0,08	161	0,671
	40	186,1	229,8	8,46	1,722	26,05	71,39	71,6	0,21	152,5	0,699
	30	147,1	168	16,4	1,729	43,28	65,8	66,5	0,7	147,4	0,714
	25	125,7	136,1	24,8	1,74	58,48	61,07	62,51	1,44	147,6	0,713
	23	116,8	123,5	30,49	1,752	67,04	58,42	60,43	1,85	149,4	0,708
	20	103,1	103	43,9	1,78	85,23	52,6	56,4	3,8	159,1	0,694
	18	93,68	63,6	72,7	1,75	119	26,2	53,5	27,3	333	0,607
	15	79,2	/68,08	-	/1,78	-	-	45,56	-	/144,2	/0,64
5,5	50	220	287,8	5,85	1,893	16,47	73,7	73,79	0,09	183,7	0,664
	40	186,1	226,9	9,53	1,895	25,77	70,6	70,84	0,24	173,2	0,69
	30	147,1	165,2	18,36	1,904	42,98	64,7	65,48	0,78	167,9	0,702
	25	125,7	133	28,57	1,917	58,48	59,4	61,13	1,73	170,8	0,697
	23	116,8	120,2	35,4	1,93	67,5	56,21	58,76	2,55	175,7	0,688
	20	103,1	78	65	2,1	119,9	27,9	51,42	23,52	385/190	0,59
	18	93,68	68,8	121,3	2,1	123,6	25	46,4	21,4	354/196	0,61
	15	79,2	/53,4	-	/2,1	-	-	32,3	-	/234	/0,56

Додаток К

Характеристики ВІД насосного агрегату за зміни напруги живлення і кутів комутації

Наведено розподіл втрат в сталі та електричних втрат в обмотках статора $P_{cm} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ (рис. К.1, Рис. К.2) від вихідної потужності. Втрати в сталі розраховано за відомим підходом [101], механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за тертям у підшипниках [166].

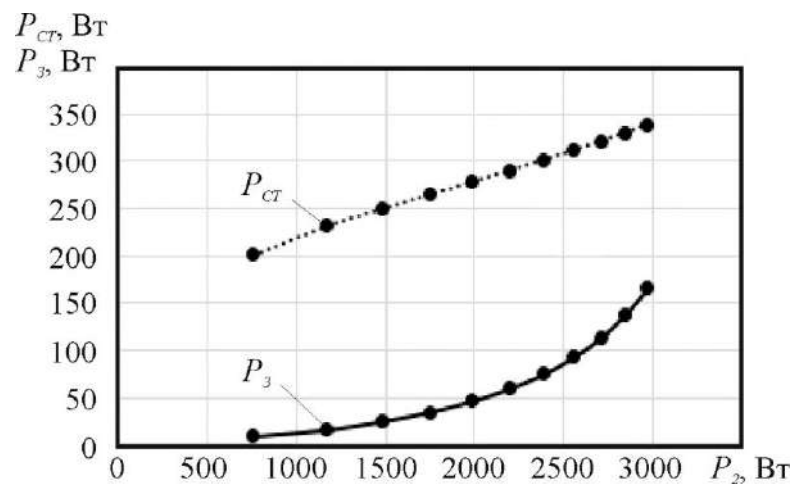


Рис. К.1 Втрати потужності $P_{cm} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ $U_d = 530$

Залежності $P_{cm} = f(P_2)$, $P_{mex} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ за зміни напруги для середнього значення моменту навантаження $M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – на рис. К.2 і К.3.

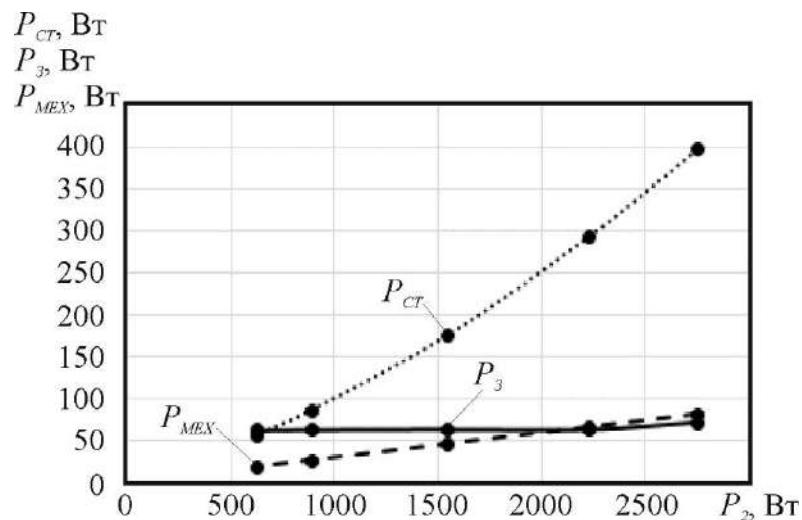


Рис. К.2 Залежності $P_{cm} = f(P_2)$, $P_{mex} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ $\theta_{fm} = 45$

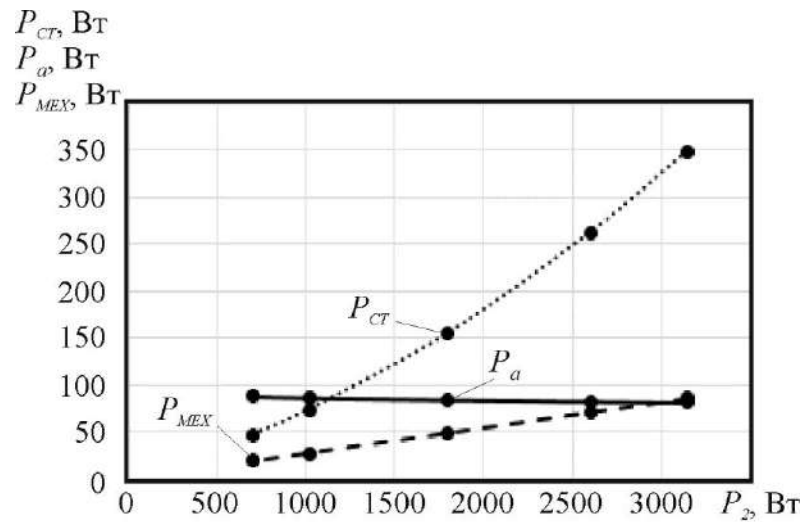


Рис. К 3 Залежності $P_{cm} = f(P_2)$, $P_{mex} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ ВІД, $\theta_{\text{вм}}^\circ = 37,5$

Залежності розподілу втрат при регулюванні частотою обертання ВІД зміною кута вмикання та постійній зоні комутації для $M_c = 6,2$ Н·м і напруг живлення 530 В та 160 В наведено на рис. К.4 і рис. К.5.

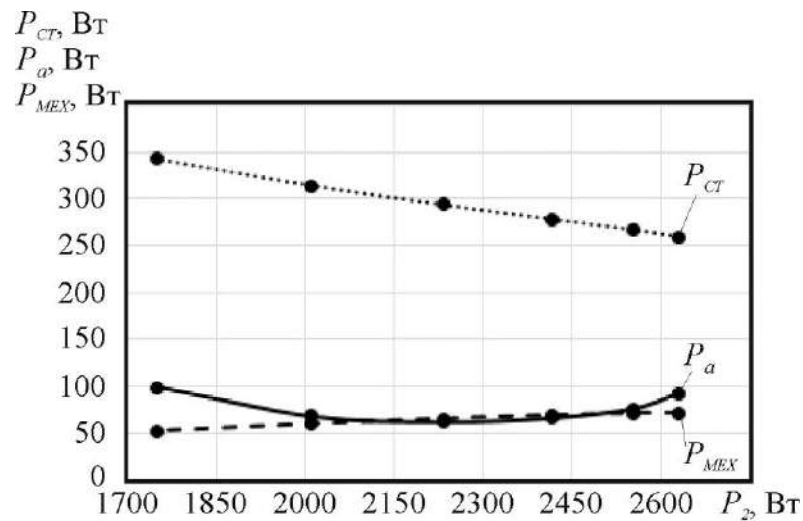


Рис. К.4 Залежності $P_{cm} = f(P_2)$, $P_{mex} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ ВІД, $\theta_{\text{вм}} - \text{var}$, $U_d = 530$ В

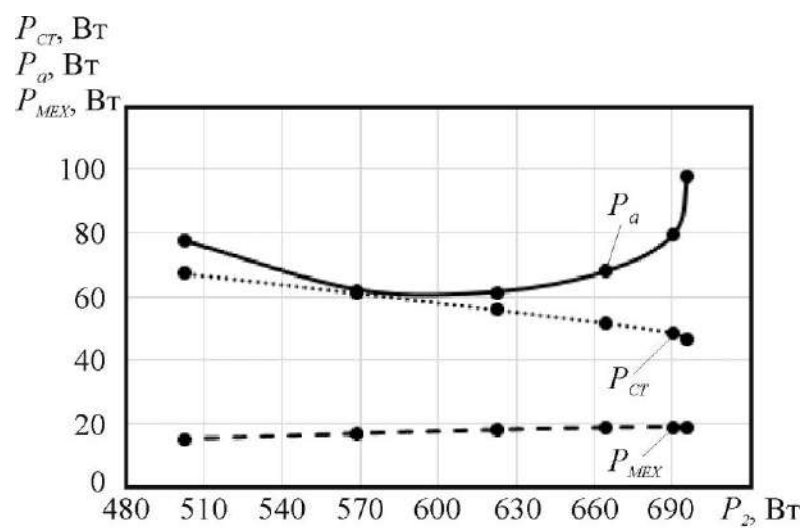


Рис. К.5 Залежності $P_{cm} = f(P_2)$, $P_{mex} = f(P_2)$, $P_a = f(P_2)$ ВІД,

$$\theta_{\omega m} - \text{var}, U_d = 160 \text{ В}, M_c = 6,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Додаток Л

Технічна реалізація експериментальних досліджень ВІД.

Л.1 Дослідний зразок

Дослідний зразок ВІД конфігурації 6/4 розроблено на базі асинхронного двигуна 4AA56A4У3 з комутатором з С-скиданням і коливальним поверненням енергії. Геометричні розміри статора й ротора індукторної машини відповідають даним, що наведено у табл. 3.1.

Параметри обмотки статора: число котушок у фазі $n_k = 2$, число витків в котушці $w_k = 250$, обмотувальний дріт ПЕТ 150 (діаметр 0,4мм). Довжина пакета 60 мм. Активні опори фазних обмоток статору в практично холодному стані ($t_{навк} = 20^\circ\text{C}$) дорівнюють 13,1 Ом. Графічна інтерпретація розподілу індуктивності обмоток $L_\phi(\theta)$ при різних положеннях ротора (в залежності від кута повороту) представлена на рис. Л.1. Максимальне її значення відповідає 0,2 Гн, мінімальне – 0,04 Гн.

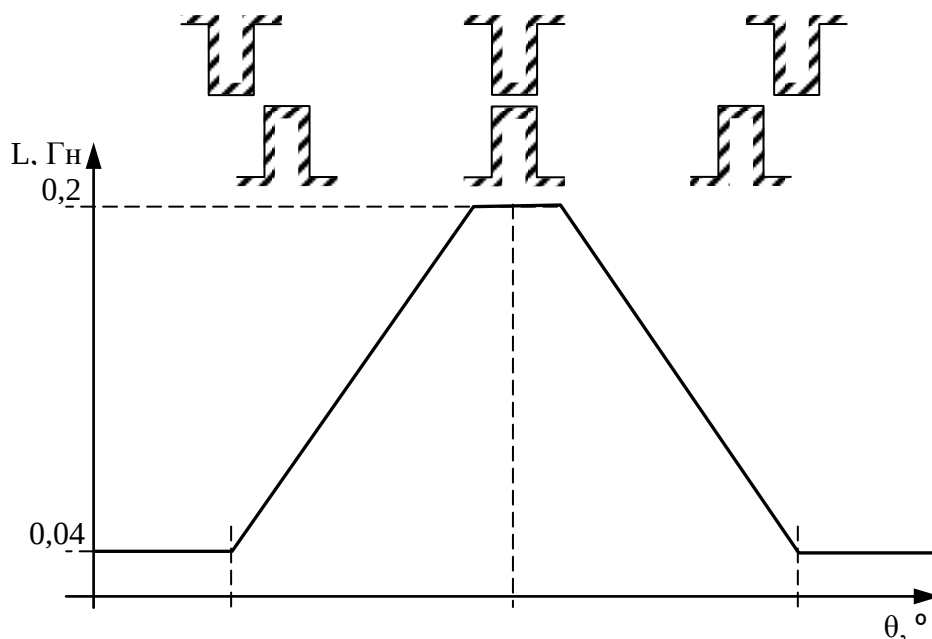


Рис. Л.1 Графічна інтерпретація розподілу індуктивності обмоток $L_\phi(\theta)$

Для дослідження режимів роботи та характеристик ВІД у відділі електро механічних систем Інституту електродинаміки НАН України розроблено експериментальний стенд [118], схема якого зображена на рис. Л.2.

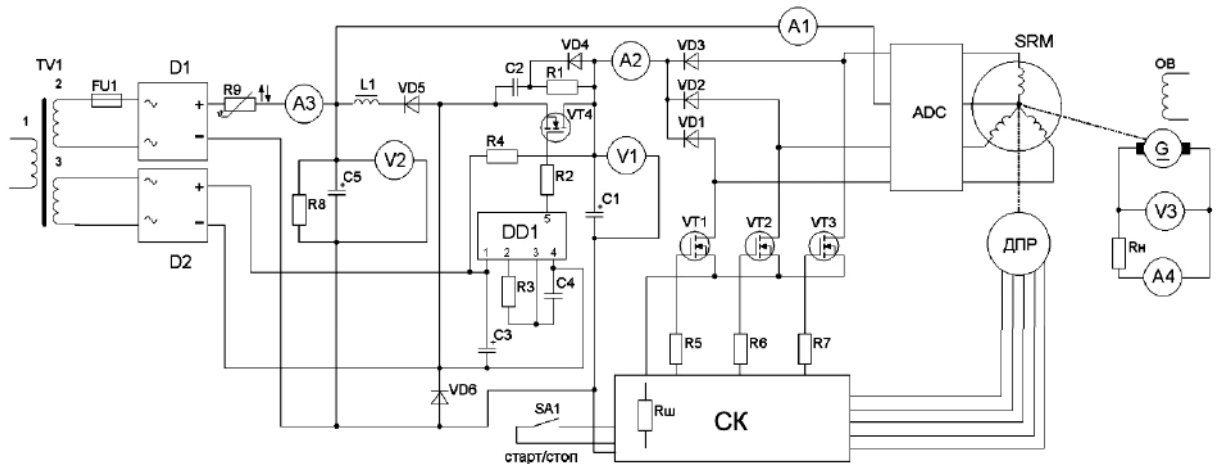


Рис. Л.2 Схема експериментального стенда

В схемі позначено: SRM (BIM) – вентильно-індукторна машина, ДПР – датчик положення ротора, G – навантажувальна машина (двигун постійного струму з незалежним збудженням СЛ661РГ) – рис. Л.3; СК – система керування PICDEM MC LV компанії Microchip на базі мікроконтролера PIC18F2431 – рис. Л.4; ADC – аналогово-цифровий перетворювач, A1...A4 – амперметри, V1...V3 – вольтметри, C1 – конденсатор скидання енергії, C5 – конденсатор фільтра.

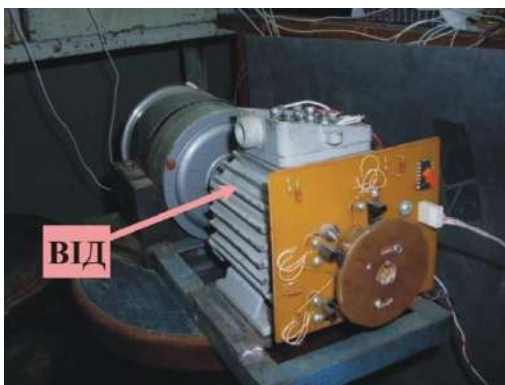


Рис. Л.3 Фото експериментального стенда Рис. Л.4 Фото схеми керування ВІД

Живлення BIM здійснюється від регульованої мережі змінного струму напругою 0...220 В, 50 Гц через знижувальний трансформатор TV1, перша вторинна обмотка якого через запобіжник FU1 підключена до випрямляча D1, який у свою

чергу – через термістор R9 з від’ємним температурним коефіцієнтом опору (ТКО) та амперметр A3 навантажений конденсатором фільтру C5. Термістор значно знижує потужний імпульс струму зарядки конденсатора фільтра при ввімкненні трансформатора в мережу і практично не впливає на подальшу роботу схеми. Амперметр A3 вимірює струм I_d , що споживається системою в цілому. Конденсатор фільтра зашунтований високоомним опором R8 для його розрядки після відімкнення системи від мережі і підключений до вольтметра V2, що вимірює напругу, яка прикладається до фаз ВІМ. Позитивний полюс конденсатора через амперметр A1 з’єднаний зі спільною точкою фаз ВІМ, які з’єднані зіркою. Комутація фаз ВІМ здійснюється MOSFET ключами VT1, VT2 або VT3, напругою на затворі яких через обмежувальні резистори R5, R6 і R7 керує система керування СК. Система керування виробляє послідовність імпульсів напруги керування ключами у залежності від показань розробленого трифазного датчика положення ротора оптичного типу PS та обмежує струм у фазі ВІМ за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) при її пуску та перевантаженні, контролюючи його на внутрішньому опорі $R_{ш}$. Через вентилі VD1, VD2, або VD3 та амперметр A2 здійснюється скидання енергії, яка накопичується у фазах ВІМ, на конденсатор C1, до якого з’єднаний вольтметр V1. Повернення енергії фаз з конденсатора C1 в коло постійного струму здійснюється чоперною схемою, що складається з MOSFET ключа VT4, який через обмежуючий опір R2 керується імпульсами частотою 20 кГц зі скважністю приблизно 0,45, (оскільки відомо, що найкращі показники ВІМ досягаються при співвідношенні напруг на конденсаторі фільтру та конденсаторі скидання енергії приблизно 0,5), високочастотного дроселя L1 та діодів VD5 і VD6. Елементи R1, C2 та VD4 утворюють снабер, який формує безпечну криву вимкнення ключа VT4. Імпульси керування чоперною схемою формуються мікросхемою-драйвером напівмостового інвертора DD1.

Слід зазначити, що живлення мікросхеми від внутрішніх напруг робить всю схему, яка наведена в [138], непрацездатною, оскільки запуск мікросхеми відбувається приблизно через 0,5...1с після початку роботи ВІМ, що робить неможливим повернення накопиченої енергії фаз у коло постійного струму,

змушуючи її викликати перенапруги на вентилях, виводячи їх з ладу. Тому живлення цієї мікросхеми [118], на відміну від схеми [138], здійснюється в розробленому експериментальному стенді від другої вторинної обмотки трансформатора TV1 через випрямляч D2 та фільтр C3, що забезпечує надійну роботу мікросхеми з самого моменту появи напруги у системі.

Таким чином, наростання струму у фазі здійснюється по контуру: конденсатор C5 – фаза – силовий ключ (VT1, VT2 або VT3), опір шунта, конденсатор C5. Гасіння струму відбувається по контуру: C5 – фаза – зворотний діод (VD1, VD2 або VD3) – конденсатор скидання C1 – конденсатор C3. Енергія, що накопичується в магнітному полі, при почерговому відключенні фаз, імпульсами передається на конденсатор скидання C1. У результаті він заряджається до напруги, що значно перевищує напругу на виході випрямляча D1 (напруга на конденсаторі C5).

Для дослідження характеристик на одній станині закріплений та з'єднаний з ротором ВІМ генератор, в якості якого використаний двигун постійного струму з незалежним збудженням.

Л.2 Експериментальні дослідження основних властивостей ВІД

Л.2.1 Механічні і енергетичні характеристики

Корисна потужність вентиляно-індукторного двигуна визначається через потужність та втрати в генераторі:

$$P_2 = U_z \cdot I_z + P_{щ} + I_z^2 \cdot R_z + P_{мех} + P_c ,$$

де $P_z = U_z \cdot I_z$ – потужність генератора, $P_{щ}$ – втрати на щітках, $I_z^2 R_z$ – втрати в міді, P_c – втрати в сталі генератора, $P_{мех}$ – механічні втрати генератора.

За даними корисної потужності та частоти обертання ВІД розраховано момент двигуна та побудовано механічні характеристики при різних напругах живлення [118] для кутів вмикання і вимикання – 12° і 42° відповідно (рис. Л.5).

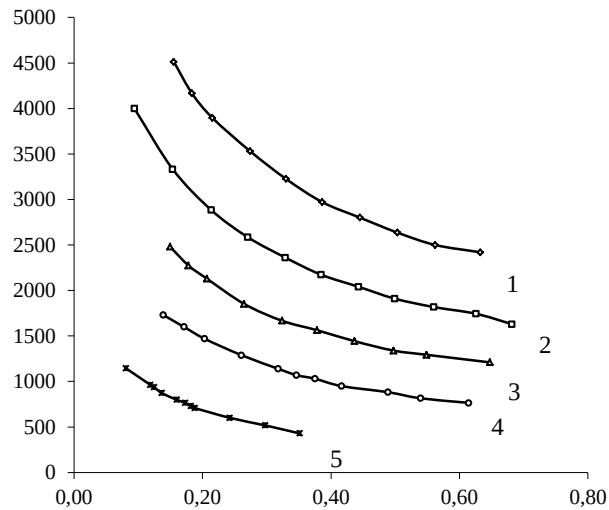


Рис. Л.5 Механічні характеристики при різних напругах ланки постійного струму:

1 – 200В, 2 – 150В, 3 – 110В, 4 – 80В, 5 – 48В

Відповідно до представлених механічних характеристик щодо ВІД з номінальним моментом 0,33 Нм, який може використовуватися для приводу поршневого компресора, регулювання частоти обертання в межах від 3000 об/хв до 600 об/хв можна забезпечити при зміні напруги від 200В до 48В. Коефіцієнт корисної дії ВІД розраховується за виразом (3.42) з врахуванням втрат в системі повернення енергії. Залежності ККД від моменту на валу ВІД при різних напругах живлення наведено на рис. Л.6.

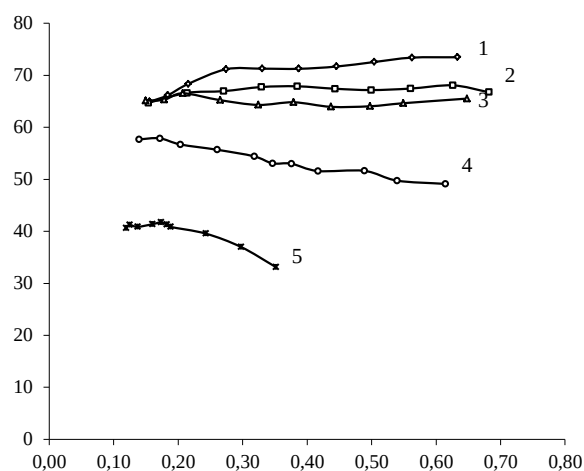


Рис. Л.6 Залежності ККД від моменту на валу ВІД при різних напругах ланки постійного струму : 1 – 200В, 2 – 150В, 3 – 110В, 4 – 80В, 5 – 48В

Втрати в сталі двигуна визначались як різниця між сумарними втратами ВІД та механічними і втратами в міді. Втратами в ключах інвертора зневажається. Розподіл втрат при напрузі 150 В наведено на рис. Л.7.

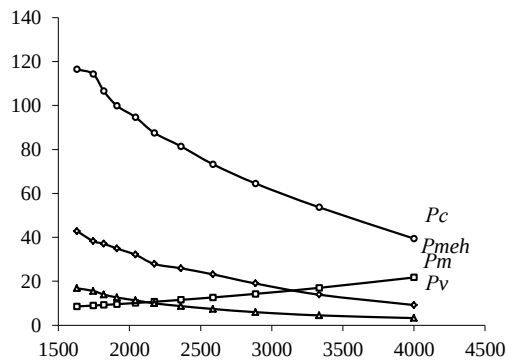


Рис. Л.7 Розподіл втрат ВІД при напрузі 150 В

Для напруги ланки постійного струму 200В та моменту навантаження 0,33 Нм коефіцієнт корисної дії ВІД становить 74%. В той же час номінальний ККД серійного двигуна 4AA56A4У3 $\eta=63\%$ при номінальній напрузі 220 В.

Л.2.2 Аналіз осцилограм струму фаз

Осцилограми струмів фаз при одинокій комутації та напрузі живлення 110В і 150В в режимі холостого ходу і механічного навантаження (при з'єднанні з валом генератора), а також при варіюванні навантаження приведено на рис. Л.8 – Л.11, дані, що отримані при їх дослідженні, – в табл. Л.1.

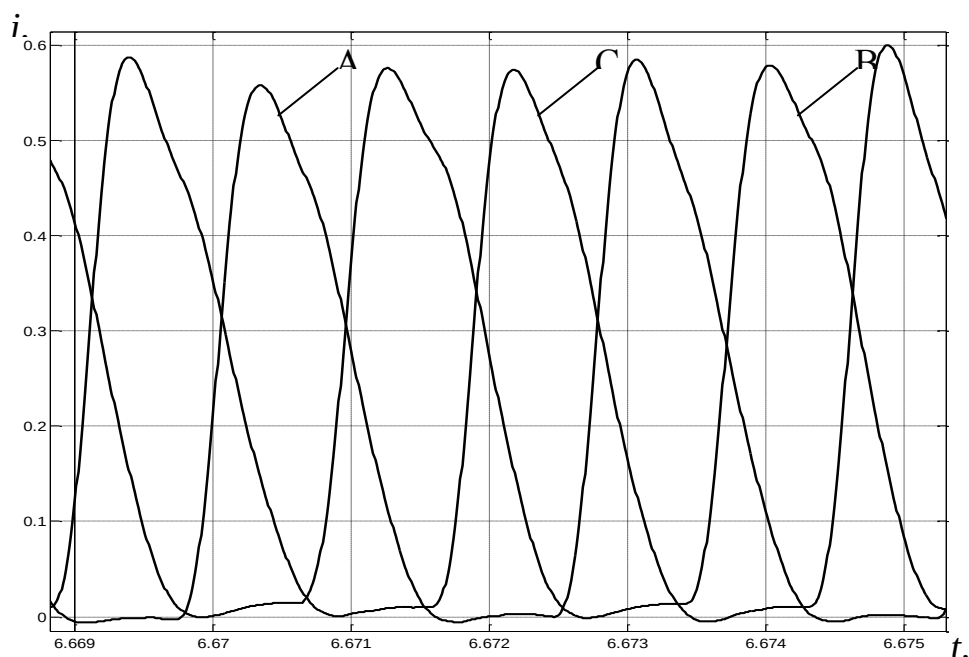


Рис. Л.8 Осцилограми струмів фаз ВІД в режимі холостого ходу при напрузі 100В

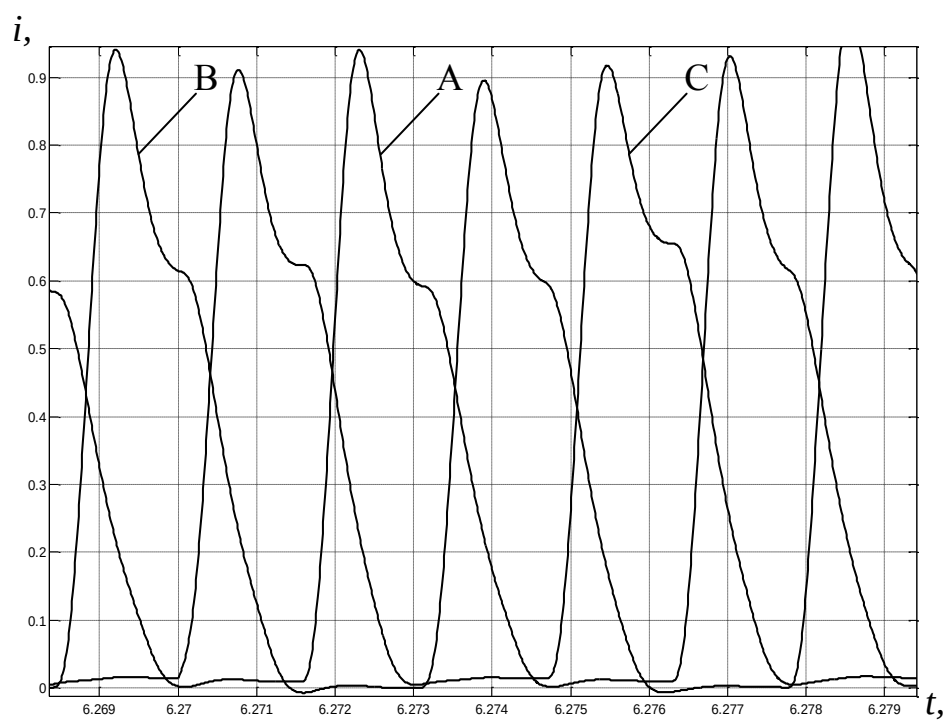


Рис. Л.9

Осцилограми струмів фаз ВІД в режимі механічного навантаження при напрузі 110В

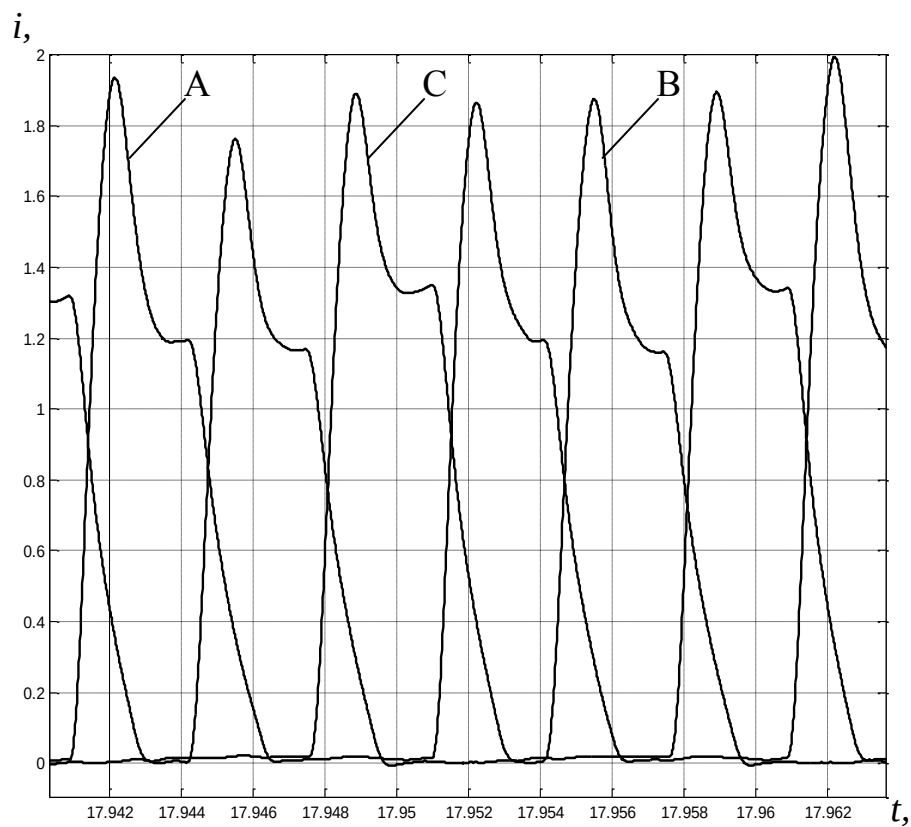


Рис. Л.10 Осцилограми струмів фаз ВІД при напрузі 110В при навантаженні 1,5А

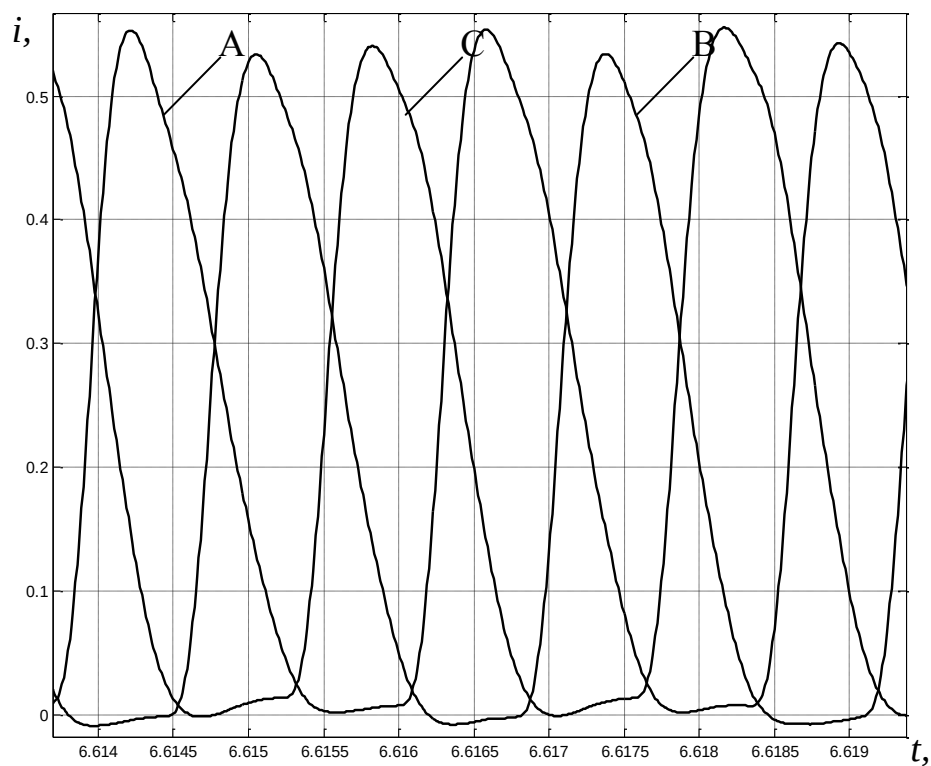


Рис. Л.11 Осцилограми струмів фаз ВІД при напрузі 150В в режимі холостого ходу

Таблиця Л.1

Параметри часових інтервалів комутації і струмів ВІД для різних напруг

Параметри	Тип навантаження ВІД на експериментальному стенді					
	Холостий хід		Механічне		струм 1,5 А	
$U, \text{В}$	110	150	110	150	110	150
$\omega_r, \text{с}^{-1}$	5423	6426	3240	4167	1502	2031
$I_n, \text{А}$	3,472	3,683	3,217	3,1	3,47	3,018
$I_{сер}, \text{А}$	0,62	0,603	0,904	0,926	1,773	1,85
$I_{макс}, \text{А}$	0,821	0,755	1,261	1,264	2,423	2,699
$t_{\phi}, \text{с}$	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$4,63 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$9,98 \cdot 10^{-3}$	$7,38 \cdot 10^{-3}$
$t_p, \text{с}$	$9,21 \cdot 10^{-4}$	$7,78 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$2,53 \cdot 10^{-3}$
$t_{снод}, \text{с}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$1,01 \cdot 10^{-3}$	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$2,22 \cdot 10^{-3}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$

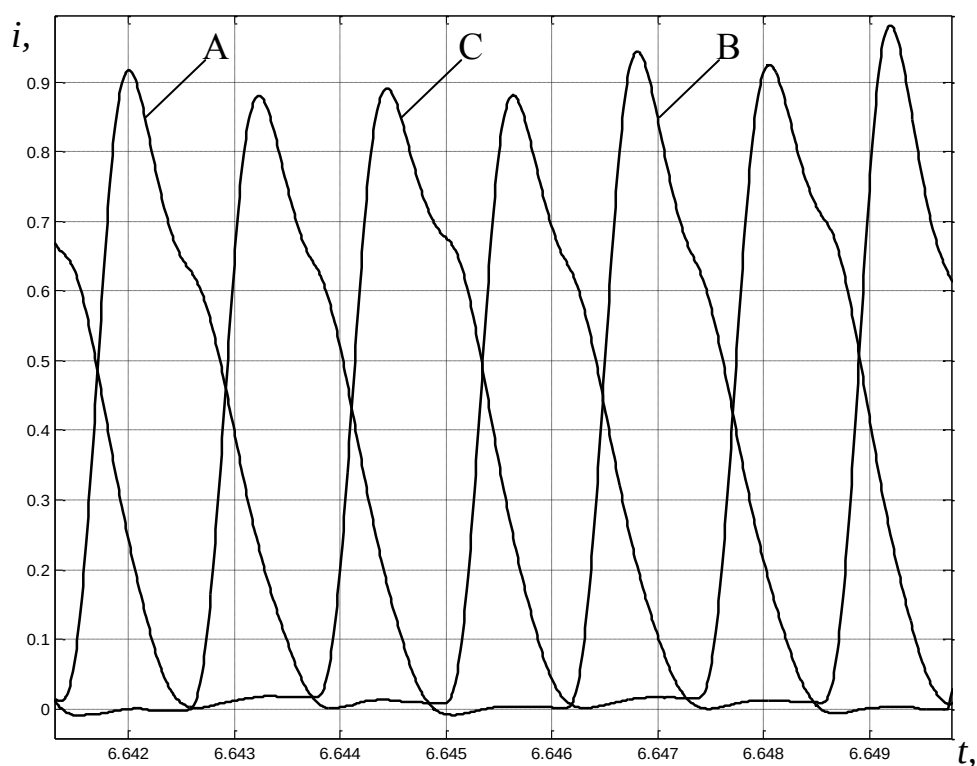


Рис. Л.12 Осцилограми струмів фаз двигуна при напрузі 150В
в режимі механічного навантаження

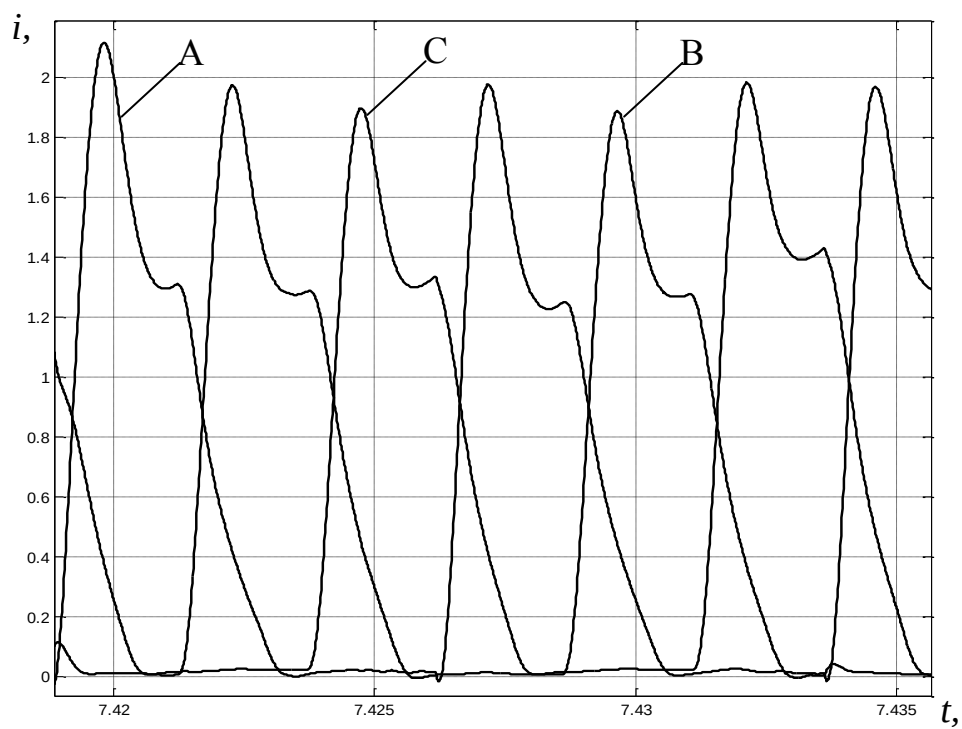


Рис. Л.13 Осцилограми струмів фаз двигуна при напрузі 150В при навантаженні 1.5А

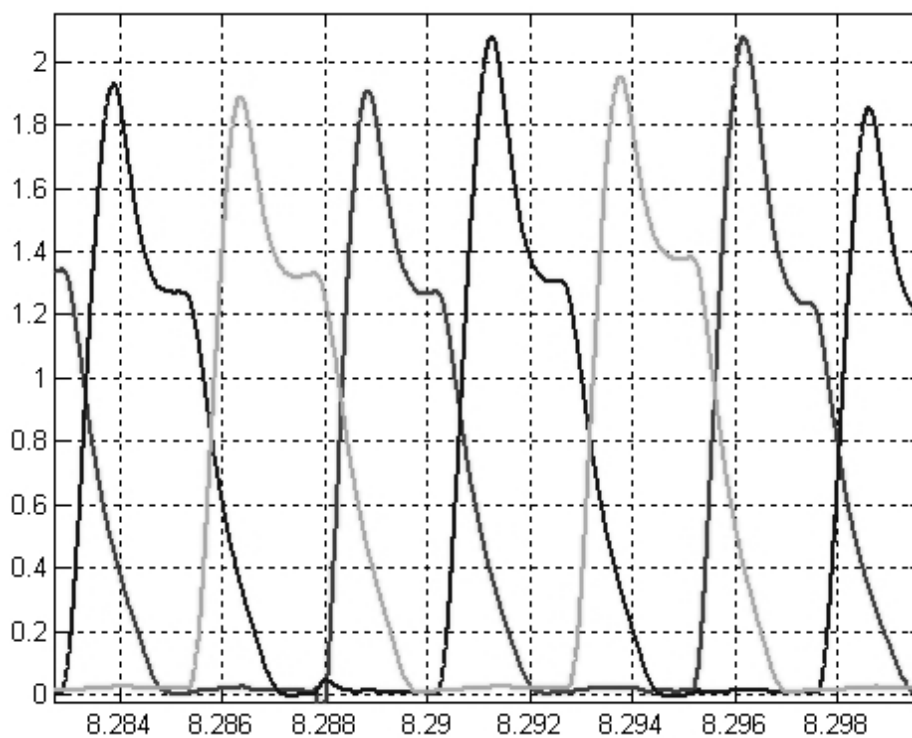


Рис. Л.14 Осцилограми струмів фаз при одинокій комутації, напрузі живлення 150В та частоті обертання 2030 об/хв

Таким чином, використання схеми з комутатором з С-скиданням і коливальним поверненням енергії і системи керування на базі мікроконтролера PIC18F2431 забезпечило необхідні характеристики для приводу поршневого компресора та дозволило забезпечити надійний пуск при зниженні напруги до $0,4 U_n$ ($U_n=200$ В) та діапазон регулювання частоти обертання в межах 1:5 (3000 об/хв : 600 об/хв).

Аналіз осцилограм струму експериментального зразка при використанні комутатора з С-скиданням і коливальним поверненням енергії при варіюванні напруги ланки постійного струму до 150 В і кутах вмикання і вимикання фаз відповідно $\theta_{\text{вм}}=12^\circ$ і $\theta_{\text{вим}}=42^\circ$ показав відсутність кидків струму при їх відключенні. При цьому напруга на конденсаторі скидання C1 перевищує напругу та конденсаторі постійної ланки C5 у 2,4 рази.

Додаток М

Результати розрахунків режимів роботи насосного агрегату системи водопостачання багатоповерхового будинку з АД потужністю 3 кВт

Таблиця М.1

Параметри режимів насоса з нерегульованим асинхронним приводом

Параметри режиму	$Q_i, \text{м}^3 / \text{год}$							
	2	4	6	8	10	12	16	20
$H_{\text{pump}}, \text{м}$	23.87	25,34	26,49	27,32	27.83	28,02	27,42	25.56
$H_{\text{opt}}, \text{м}$	18.04	18,16	18,35	18,63	18.98	19,41	20,51	21.92
$K_{\text{ef}}, \text{в.о.}$	0,07997	0,1443	0,1974	0,2425	0,2818	0,3168	0,3798	0,4434
$\eta_{\text{агр}}, \%$	10.58	20,14	28,5	35,57	41.31	45,73	50,78	51.68
$\eta_{\text{АД}}, \%$	76.48	78.08	79.35	80.35	81.14	81.75	82.52	82.78
$\eta_{\text{pump}}, \%$	13.84	25.79	25.91	44,27	50.91	55,94	61,53	62.43
$P_1, \text{Вт}$	1242	1386	1535	1691	1854	2024	2378	2722
$P_{\text{gopt}}, \text{Вт}$	99,32	200	303,0	410,07	522,46	641,2	903,16	1206,9
$W_i, \text{Вт} \cdot \text{год}$	4968	2772	4605	3382	3708	6072	7134	13610
$T_i, \text{год}$	4	2	3	2	2	3	3	5

Таблиця М.2

Регулювання насосного агрегату за максимальним значенням коефіцієнта ефективності ЕМС при зміні напруги та частоти живлення АД

Параметри режиму	$Q, \text{м}^3 / \text{год}$							
	2	4	6	8	10	12	16	20
$U^*, \text{в.о.}$	0,39	0,36	0,37	0,38	0,404	0,45	0,59	1
$f^*, \text{в.о.}$	0,924							0,926
$H_{\text{pump}}, \text{м}$	18.18	18,2	18.64	18.71	19.01	19.8	20.87	21.98
$H_{\text{opt}}, \text{м}$	18.04	18,16	18.35	18.63	18.08	19.41	20.51	21.92
$K_{\text{ef}}, \text{в.о.}$	0.1188	0,211	0.2812	0.3374	0.3821	0.4186	0.4842	0.5091
$\eta_{\text{агр}}, \%$	11,97	21.14	28.55	33.89	38.26	42.68	49.27	51.04
$\eta_{\text{pump}}, \%$	15.76	29.84	69.33	67.66	56.13	59.68	62.4	62.05
$\eta_{\text{АД}}, \%$	75.97	70.84	69.33	67.66	68.17	71.63	78.95	82.26
$P_1, \text{Вт}$	835.7	947.5	1078	1216	1367	1532	1865	2370
$P_{\text{gopt}}, \text{Вт}$	99,3	200	302,9	410.3	522.3	621.3	903	1206.6
$W_i, \text{Вт} \cdot \text{год}$	3342.8	1895	3234	2432	2734	4596	5595	11850

Таблиця М.3

Регулювання АД насосного агрегату за законом Костенка

Параметри режиму	$Q, \text{ м}^3 / \text{год}$							
	2	4	6	8	10	12	16	20
$U^*, \text{ в.о.}$	0,924							0,94
$f^*, \text{ в.о.}$	0,924							0,94
$H_0, \text{ м}$	18,01							18,04
$H_{\text{pump}}, \text{ м}$	20.53	21.86	22.88	23.57	23.94	23.99	23.12	21.95
$H_{\text{opt}}, \text{ м}$	18.04	18,16	18.35	18.63	18.98	19.41	20.51	21.92
$K_{\text{ef}}, \text{ в.о.}$	0.09923	0,1778	0.2419	0.2955	0.3416	0.3826	0.4561	0.5138
$\eta_{\text{aep}}, \%$	11.29	21.41	30,15	37.39	43.09	47.28	51,42	51.45
$\eta_{\text{pump}}, \%$	14.88	27.55	38.1	46.59	53.12	57.8	62.22	62.05
$\eta_{\text{AD}}, \%$	75.92	77.71	79.13	80.25	81.12	81.79	82.64	82.91
$P_1, \text{ Вт}$	1001	1124	1257	1216	1388	1529	1676	2349
$P_{\text{opt}}, \text{ Вт},$	99,3	200	302,9	410.3	522.3	621.3	903	1206.6
$W_i, \text{ Вт} \cdot \text{год}$	4004	2248	3759	2776	3059	5028	5940	11745

Таблиця М.4

Регулювання АД насосного агрегату за мінімальним значенням напору

Параметри режиму	$Q, \text{ м}^3 / \text{год}$							
	2	4	6	8	10	12	16	20
$U^*, \text{ в.о.}$	1	1	1	0,728	0,88	0,855	0,818	1
$f^*, \text{ в.о.}$	1,0374	1,0048	0,98	0,98	0,96	0,96	0,98	1
$H_0, \text{ м}$	22,71	21,3	20,26	20,26	19,45	19,45	20,26	21,1
$H_{\text{pump}}, \text{ м}$	25,56	25,56	25,55	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56
$H_{\text{opt}}, \text{ м}$	18,04	18,16	18,35	18,63	18,98	19,41	20,51	21,92
$K_{\text{ef}}, \text{ в.о.}$	0,0739	0,1428	0,2057	0,2759	0,3212	0,3618	0,4139	0,4434
$\eta_{\text{aep}}, \%$	10,46	20,11	28,63	37,85	43,25	47,64	51,59	51,68
$\eta_{\text{pump}}, \%$	13,39	25.69	36,45	45,32	52,15	57,07	61,87	62,43
$\eta_{\text{AD}}, \%$	78,15	78,29	78,54	83,53	82,89	84,07	83,36	82,78
$P_1, \text{ Вт}$	1345	1399	1474	1486	1627	1772	2182	2722
$W_i, \text{ Вт} \cdot \text{год}$	5380	2798	4422	2972	3254	5316	6546	13610

Регулювання насосного агрегату за максимальним ККД насоса

Параметри режиму	$Q, \text{ м}^3 / \text{год}$							
	2	4	6	8	10	12	16	20
$U^*, \text{ в.о.}$	0,6	0,63	0,66	0,69	0,72	0,75	0,8	1
$f^*, \text{ в.о.}$	0,924							1,04
$H_0, \text{ м}$	18,01	18,01	18,01	18,01	18,01	18,01	18,01	22,82
$H_{\text{pump}}, \text{ м}$	19,88	21,2	22,22	22,93	23,33	23,43	22,65	27,86
$H_{\text{opt}}, \text{ м}$	18,04	18,16	18,35	18,63	18,98	19,41	20,51	21,92
$K_{\text{eq}}, \text{ в.о.}$	0,1138	0,1993	0,266	0,3198	0,3646	0,4034	0,4718	0,4079
$\eta_{\text{aэp}}, \%$	12,54	23,27	32,2	39,36	44,82	48,68	52,1	51,83
$\eta_{\text{pump}}, \%$	15,11	27,93	38,54	47,02	53,49	58,06	62,67	62,49
$\eta_{\text{AD}}, \%$	82,98	83,32	83,56	83,71	83,8	83,83	83,66	82,94
$P_1, \text{ Вт}$	872,8	1003	1139	1283	1433	1590	1915	2959
$W_i, \text{ Вт} \cdot \text{год}$	3491,2	2006	3417	2566	2866	4770	5745	14795

Додаток Н

Показники робочих режимів моноблочного насосу БЦ1,1-20-У1

з двополюсним конденсаторним АД потужністю 550 Вт з серійною, вдосконаленими
серійною та синусною обмотками

Таблиця М 1

Конструктивні параметри схеми		Варіанти обмоток					
		Серійна W = 51,105		Вдосконалена серійна W = 50,94		Вдосконалена синусна	
фаза А	n ₁	5,6,7,8,-17,-18,-19,-20		5,6,7,8,-17,-18,-19,-20		4,3,2,1,-16,-15,-14,-13	
	n ₂	-16,-15,-14,-13,4,3,2,1		-16,-15,-14,-13,4,3,2,1		-9,-10,-11,-12,21,22,23,24	
	W	51,51,51,51,51,51,51,51		50,50,50,50,50,50,50,50		41,43,50,52,41,43,50,52	
	d _г , мм	0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71		0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71,0.71		0.56,0.56,0.71,0.71,0.56,0.56,0.71,0.71	
фаза В	n ₁	12,11,-23,-24		12,11,-23,-24		10,9,8,7,-22,-21,-20,-19	
	n ₂	-21,-22,10,9		-21,-22,10,9		-15,-16,-17,-18,3,4,5,6	
	W	105,105,105,105		94,94,94,94		56,59,68,73,56,59,68,73	
	d _г , мм	0.5,0.5,0.5,0.5		0.53,0.53,0.53,0.53		0.45,0.45,0.6,0.6,0.45,0.45,0.6,0.6	
Показники робочого режиму		просторові гармоніки					
		1	1,3,5,7	1	1,3,5,7	1	1,3,5,7
P ₂ , Вт		556.7	554.5	556.6	554.9	564.2	564.3
ω _г ,с ⁻¹		283.3	281.9	282.5	281.4	287	286.3
η		0.7235	0.705	0.7235	0.7082	0.713	0.711
cosφ АД		0.996	0.997	0.987	0.988	0.979	0.979
B _{δ1} ,Тл		0.737	0.735	0.738	0.735	0.787	0.786
P _{гp} ,Вт		193.5	215.2	193.4	209.5	206.8	208.8
I _{s1} , А		2.40	2.45	2.72	2.75	2.66	2.66
I _{s2} , А		1.65	1.66	1.56	1.57	1.7	1.69
I _м , А		3.51	3.59	3.54	3.60	3.67	3.68
I _п , А		9.91	9.81	10.3	10.2	10.65	10.55
M _{ДЛ} , Н*М		1.06	1.04	0.942	0.924	1.06	1.06

В таблиці позначено: n_1 , n_2 – номери за пазами перших та других сторін секцій (котушки) обмотки, з яких складаються фази статора (знак вказує на напрямок обходу секції), W – кількість витків секції, d_r – діаметр проводу без ізоляції.