

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

В.В.Зіновкін

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з дисципліни

**«ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СКЛАДНИХ
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА
КОМПЛЕКСІВ»**

(Фізико-математичні методи дослідження складних електромеханічних систем та рекомендації до виконання лабораторних та самостійних робіт)

(для усіх форм навчання)

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

спеціалізація 14 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

2022

Конспект лекцій з дисципліни «Основи наукових досліджень складних електромеханічних систем та комплексів» (частина 4. Фізико-математичні методи дослідження складних електромеханічних систем та рекомендації до виконання лабораторних та самостійних робіт) (для усіх форм навчання) спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізація 14 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод». Інженерно-фізичний інститут, Електротехнічний факультет. / Укл. В.В.Зіновкін. - Запоріжжя. НУ «Запорізька політехніка». 2022. - 82 с.

Укладачі:

В.В.Зіновкін, проф., д.т.н.

Рецензент:

Ю.О. Крисан, доц., к.т.н.

Відповідальний
за випуск:

А.В.Пирожок, Зав.каф.ЕПА, доц., к.т.н.

Затверджено на засіданні кафедри ЕПА
Протокол № 11 від 10.06.2022 р.

Рекомендоване до видання НМК ЕТФ
Протокол № 6 від 23.06 2022 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Фізико-математичні методи дослідження складних електромеханічних систем.....	8
1.1 Методологічні підходи розробки моделей електромеханічних систем	9
1.2 Аналіз переваг та недоліків синхронних двигунів.....	10
1.3 Характерні риси динамічної і статичної стійкості.....	14
1.4 Принципові основи побудови математичної моделі.....	16
1.5 Математичний зв'язок між електромагнітними та електромеханічними параметрами.....	18
2 Розробка математичної моделі синхронного електропривода.....	22
2.1 Динаміка перерозподілу енергії при навантаженні синхронного електропривода.....	22
2.2 Коливання валу синхронного двигуна в режимах навантаження.....	24
2.3 Аналітичні залежності між електромагнітними і механічними процесами.....	27
2.4 Вплив вищих гармонік на синхронний електропривод.....	29
2.5 Вплив першої гармоніки статорного струму на електромагнітний момент.....	37
2.6 Електромагнітний момент синхронного двигуна.....	40
3 Розробка комп'ютерної моделі синхронного електропривода для дослідження статичної стійкості.....	46
3.1 Схема заміщення синхронного двигуна в системі координат q-d осей.....	46
3.2 Представлення визначальних параметрів синхронного двигуна в системі Synchronous Machinepu Fundamental.....	49
3.3 Спеціалізовані засоби забезпечення статичної стійкості.....	52
3.4 Фізико-математична модель синхронного електропривода при статичній стійкості.....	56
3.5 Початкові і граничні умови забезпечення статичної стійкості синхронної машини	58

3.6 Умови відповідності математичної моделі фізичним процесам при статичній стійкості синхронного електропривода.....	61
3.7 Математична модель синхронного електропривода при автоматизованому забезпеченні статичної стійкості.....	67
3.8 Похідні дані та інженерні розрахунки визначальних параметрів.....	68
3.9 Комп'ютерна модель обертового моменту бігучого магнітного поля	72
3.10 Матеріали та результати дослідження	75
Перелік використаних джерел.....	81

ВСТУП

Дисципліна «Фізико-математичні методи дослідження складних електромеханічних систем та об'єктів» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціалізація «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» відповідає вимогам Освітньої програми «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» і призначена для більш досконалого засвоєння теоретичних та інженерних методів розрахунків та наукового дослідження складних електромеханічних систем та об'єктів і їх функціонування в статичних і динамічних режимах. Вона є складовою підготовки магістрів і спеціалістів денної та заочної форм навчання, та сприяє більш ґрунтовного засвоєння теоретичних основ і оволодіння студентами і аспірантами методів складання математичних і комп'ютерних моделей та інженерних розрахунків визначальних параметрів, що відображають працездатність електромеханічних систем та об'єктів і оцінювати поточний технічний стану (діагностувати) в умовах експлуатації.

В методичних вказівках приведено теоретичні основи електромагнітних та електромеханічних процесів в складних електромеханічних системах, методологічні підходи та методи дослідження і розрахунків визначальних параметрів. Для вивчення повного курсу студентам необхідно звернутися до літератури яка наведена в методичних вказівках. Наведені методи та приклади можуть бути використані при інженерних розрахунках, наукових дослідженнях, виконанні практичних та самостійних робіт і дипломному проектуванні за спеціальністю.

Фізико-математичні дослідження електромагнітних процесів у складних електромеханічних системах, що приведені в дійсних методичних вказівках, сприяють сприйнятті методів і методологічних основ наукового дослідження.

Надійність та ефективність роботи синхронних електроприводів суттєво залежить від умов експлуатації та дотримання вимог державних стандартів та нормативно-технічної документації [1-12]. В системах електропостачання енергоємних промислових підприємств та регіонів такі вимоги порушуються внаслідок особливостей електротехнологічних процесів енергоємних технологічних комплексів та ін. При цьому в

системах відбувається перерозподіл реактивної та активної потужностей, що призводить до погіршення показників якості електричної енергії, зниження техніко-економічних показників, зростання механічних коливань валу синхронного електродвигуна та ін. [4-8]. При цьому відбуваються такі фізичні процеси, що призводить до формування нестационарних електромагнітних та електромеханічних процесів в електроприводі. Внаслідок таких умов експлуатації погіршується ефективність використання електротехнічного та електротехнологічного обладнання, зростають енерговитрати на одиницю продукції, що виробляється, та зменшуються терміни роботи обладнання [3-9].

Таким чином, в синхронних електроприводах найбільші пошкодження мають місце в електромеханічних системах внаслідок зростання механічних коливань валу електричного двигуна в режимах встановлення синхронізму. Останні пов'язані з коливанням ротору синхронної машини і мають механічний характер. Вони формуються внаслідок дії і постійного перерозподілу пружних і інерційних сил. В сталих режимах співвідношення між цими силами не змінюються, а при порушенні умов експлуатації співвідношення між ними постійно змінюються, що виводить всю електромеханічну систему із положення рівноваги. Пружні сили прагнуть вернути коливальну систему в положення рівноваги. При досягненні положення рівноваги пружні сили дорівнюють нулю. Інерційні сили прагнуть змінити кутову швидкість системи оскільки вони пропорційні прискоренню механічної системи.

При цьому постійно відбувається перерозподіл перетворення потенціальної енергії в кінетичну. Потенційна енергія пов'язана з пружними силами, а кінетична – з інерційними. Пружні сили пропорційні електромагнітному моменту, який діє на ротор електричного двигуна і залежить від кута навантаження. Деформація електромагнітного поля розсіювання в просторі електричної машини призводить до постійної зміни електромагнітного моменту. Інерційні сили залежать від динаміки механічного навантаження під час обертання ротору внаслідок дії позитивного і негативного кутового прискорення ротору. Частота власних механічних коливань валу синхронної машини складає 0,5 – 2,0 Гц. Слід відзначити, що заспокійливий механічний момент здійснюється за рахунок сил тертя, які, при додержанні директивних умов експлуатації, на механічну систему суттєво не впливають. При цьому обертовий момент магнітного поля, яке

збуджується статорними обмотками, залежить від поточного положення ротора синхронної машини. Таким чином, для розв'язання поставленої мети слід ретельно дотримуватись послідовності протікання і взаємних зв'язків між електричними, електромагнітними та електромеханічними процесами в синхронному електроприводі. При цьому слід враховувати, що принцип дії електропривода оснований на взаємній дії електромагнітних полів розсіювання в просторі електричної машини.

1 ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Сучасні науково-практичні дослідження сприяють вирішенню низки інженерних проблем, що виникають в різних галузях промисловості з метою підвищення ефективності та техніко-економічних показників [2-7]. Такі питання набувають особливої ефективності в складних електромеханічних системах та об'єктах [1 - 15]. На підставі нових науково-технічних розробок підвищується якість і скорочуються терміни проектування нових видів технічних об'єктів [1, 6, 8-19]. Умови праці в проектних організаціях в 4-5 разів, скорочуються майже до п'яти разів, а терміни проектування певних технічних об'єктів до сорока відсотків [7-11]. Поряд з наведеними перевагами використання нових наукових розробок сприяє покращенню і більш ефективному використанні математичних і комп'ютерних моделей, а також використанню сучасних мікропроцесорних та програмних засобів автоматизації керування відповідними технологічними процесами та режимами навантаження промислових комплексів [1,13-26]. В найбільш сприятливих умовах їх впровадження можливо досягти економії матеріалів та технологій до шести відсотків, а також підвищити продуктивність нових видів технічного обладнання загального та спеціального призначення [2-4,19-21].

Методологічні підходи дослідження електромеханічних процесів розглянемо на прикладі синхронного електромеханічного електропривода.

Синхронні електроприводи в умовах експлуатації потребує додержання певних технічних вимог відхилення від яких призводить до низки небажаних наслідків. При цьому електромагнітні процеси, що відбуваються в синхронному електроприводі, доволі суттєво залежать від показників якості електричної енергії, електродинамічних зусиль, що призводять до зростання механічних коливань валу двигуна, та теплового перевантаження внаслідок додаткових втрат [2, 4, 6].

Експлуатаційна надійність синхронних електроприводів є одним із основних показників забезпечення значної кількості електротехнологічних процесів промислових підприємств. [2, 4, 6].

1.1 Методологічні підходи розробки моделей електромеханічних систем

Внаслідок особливостей електротехнологічних режимів енергоємних технологічних комплексів відбувається постійний перерозподіл реактивної і активної потужностей [1 -20]. Це призводить до погіршення показників якості електричної енергії, зниження техніко-економічних показників промислових підприємств. Найбільш вразливим є зростання механічних коливань валу синхронних електроприводів та зменшення термінів надійності. Передбачити такі недоліки досить складно [1-15]. Це пов'язано з специфічними електромагнітними і електромеханічними процесами, що призводить до формування низки небажаних явищ та зниження ефективності електротехнічного та електротехнологічного обладнання, зростання енерговитрат на одиницю продукції, що виробляється, та зменшення термінів роботи обладнання [8 - 14].

З метою постановки завдання дослідження розглянемо фізичні процеси, що відбуваються у синхронному електроприводі та у просторі електричної машини. В синхронних електроприводах найбільші пошкодження мають місце в електромеханічних системах. Це пов'язано із зростанням механічних коливань валу електричного двигуна. Останні пов'язані з коливанням ротору синхронної машини і мають механічний характер. Вони формуються внаслідок дії і постійного перерозподілу пружних і інерційних сил. В сталих режимах співвідношення між цими силами не змінюються. При порушенні умов експлуатації (електричних, механічних) співвідношення між ними постійно змінюються, що виводить всю електромеханічну систему із положення рівноваги. Пружні сили прагнуть вернути коливальну систему в положення рівноваги. При досягненні положення рівноваги пружні сили дорівнюють нулю. Інерційні сили прагнуть змінити кутову швидкість двигуна оскільки вони пропорційні прискоренню механічної системи. При цьому відбувається перерозподіл перетворення потенціальної енергії в кінетичну. Потенційна енергія пов'язана з пружними силами, а кінетична – з інерційними. Пружні сили пропорційні електромагнітному моменту, який діє на ротор електричного двигуна і залежить від кута навантаження. Деформація електромагнітного поля розсіювання в просторі електричної машини призводить до постійної зміни електромагнітного моменту. Інерційні сили залежать від динаміки

механічного навантаження під час обертання ротору внаслідок дії позитивного і негативного кутового прискорення ротору. При цьому, частота власних механічних коливань валу синхронної машини знаходиться в межах 0,5 – 2,0 Гц. при промисловій частоті живлення 50 Гц.

Слід відзначити, що заспокійливий механічний момент здійснюється за рахунок сил тертя, які, при додержанні директивних умов експлуатації, на механічну систему суттєво не впливають. При цьому обертовий момент магнітного поля, яке збуджується статорними обмотками, залежить від поточного положення ротора синхронної машини відносно статора. Таким чином, для розв'язання поставленої мети слід ретельно додержуватись послідовності протікання і взаємних зв'язків між електричними, електромагнітними та електромеханічними процесами в синхронному електроприводі. При цьому слід враховувати, що принцип дії електропривода пов'язано на взаємній дії електромагнітних полів розсіювання в просторі електричної машини, які є збуджувачами електромагнітних та електромеханічних процесів.

На підставі приведеного аналізу фізичних процесів можливо сформулювати завдання даного дослідження, яке полягає в розробці:

- математичної моделі електромагнітних та електромеханічних процесів в синхронного електропривода;
- математичної і комп'ютерної моделей синхронного електропривода в режимах статичної стійкості;
- інженерної методики розрахунку механічних коливань валу ротора в порівнянні з дозволеними нормативно-технічною документацією;
- завдання для охорони праці та безпеки життєдіяльності і техніко-економічного обґрунтування отриманих результатів дослідження.

1.2 Аналіз переваг та недоліків синхронних двигунів

Синхронні двигуни можливо використовувати як в якості генератора, так і в якості двигуна. Тому вони відносяться до електричних машин зворотнього типу. Для використання синхронної машини в якості двигуна трифазну обмотку статора підключають до трифазної системи змінної напруги. Струми, що протікають в обмотках статора збуджують бігуче електромагнітне поле, яке зчіплюється з постійним електромагнітним полем, що збуджується ротором. В наслідок взаємодії

цих полів виникає електромагнітна сила, яка призводить до виникнення обертового моменту, який сприяє тому, що ротор починає рухатись в напрямку дії цього моменту. Швидкість обертового моменту ротора характеризується об/хв. Система збудження електромагнітного поля ротора синхронного двигуна принципово не відрізняється від системи збудження генератора. Не дивлячись на це, в промисловості випускаються синхронні двигуни для роботи тільки в якості генератора, або тільки в якості двигуна. Це пов'язано з принципово різними технічними вимогами до конструкції та техніко-економічних показників.

Слід відзначити, що синхронні двигуни мають, в порівнянні з асинхронними, суттєві переваги, які полягають в можливості працювати при додержанні коефіцієнта потужності 0,96. При цьому не споживають реактивної потужності з мережі, а в режимах перезбудження навіть віддають реактивну потужність в мережу. Це пояснюється тим, що синхронні двигуни мають майже аналогічну U-характеристику, як у генератора. При перезбудженні магнітної системи синхронний двигун, відносно мережі, сприймається як електрична ємність. В якості прикладу на рис.1.1 показана U-характеристика синхронного двигуна, яка пояснює можливі режими синхронного двигуна та його практичного використання в залежності від технічних вимог.

В таких випадках покращується коефіцієнт потужності мережі, а також зменшуються падіння напруги і втрати потужності.

Максимальний момент синхронного двигуна пропорційний напрузі, а асинхронного двигуна – U^2 .

Тому при зниженні напруги синхронний двигун зберігає досить велику здатність перевантаження. Внаслідок великого повітряного простору між системою збудження електромагнітного поля і магнітопроводом додаткові втрати в магнітопроводі (електротехнічній сталі) та роторі синхронних двигунів менші в порівнянні з асинхронним внаслідок чого коефіцієнт корисної дії (кпд) синхронного двигуна значно вищий.

Жорсткі механічні характеристики синхронних двигунів забезпечують дотримання постійної частоти обертового моменту при зміні механічного навантаження на валу.

До недоліків синхронних двигунів відносяться погані пускові характеристики внаслідок неможливості безпосереднього включення в мережу. Це пояснюється тим, що ротор внаслідок великої інерційності не

може зразу досягти обертової швидкості бігучого електромагнітного поля статора, яка встановлюється миттєво при підключенні до мережі.

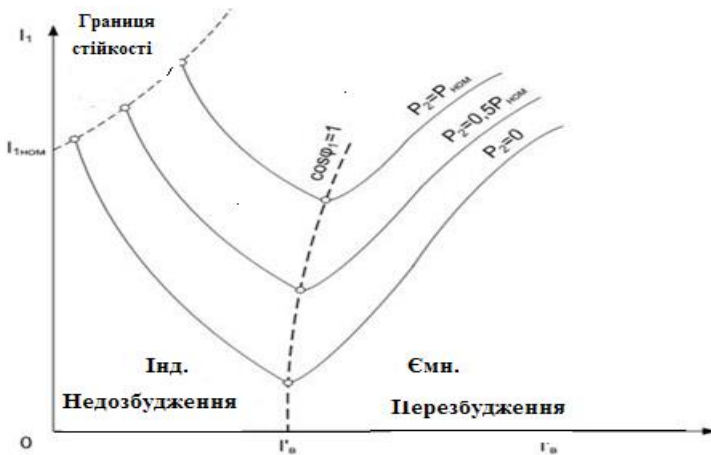


Рисунок 1.1- U-характеристика синхронного двигуна

В таких випадках порушується стійкий електромагнітний зв'язок між статором і ротором. Тому для пуску синхронного двигуна використовуються спеціальні способи попереднього приведення швидкості ротора до синхронної або наближеної до неї, при якій між статором і ротором встановлюється достатньо стійкий електромагнітний зв'язок. На практиці пуск синхронних електроприводів здійснюється за допомогою попереднього розгону двигуна, або частотним або асинхронним.

При пуску синхронного двигуна шляхом попереднього розгону використовують асинхронний двигун, який має обертову частоту більшу в порівнянні з синхронним. В деяких випадках використовують двигун постійного струму. В цьому випадку необхідно мати джерело постійного струму і відповідний двигун. Пуск шляхом попереднього розгону двигуна використовується дуже рідко, оскільки двигун, що використовується тільки для пуску, зберігати надто не раціонально з точки зору технічних і економічних показників.

При частотному пуску обмотка статора синхронного двигуна підключається до перетворювача частоти. Синхронний двигун входить в синхронізм при досить малих частотах. Такий спосіб доцільно використовувати при наявності відповідного перетворювача частоти, який можливо використовувати для пуску декількох двигунів, або для інших технічних вимог.

Найбільше розповсюдження на практиці отримав асинхронний пуск, електрична схема якого приведена на рис.1.2. Слід відзначити, що цей спосіб пуску можливо використовувати при наявності в полюсних наконечниках ротора пускової короткозамкненої обмотки.

Незбуджений синхронний двигун підключають до мережі. Виникає, при цьому, обертове (бігуче) магнітне електромагнітне поле статора наводить в стрижнях пускової кліттьєрс, яку збуджують струми I_2 . Взаємодія цих струмів з полем статора призводить до обертового процесу ротора. Після розгону ротора до обертової частоти близької досинхронної обмотку збудження підключають до джерела постійного струму. Виникаючий при цьому синхронний момент втягує ротор двигуна в синхронізм.

Під час асинхронного пуску магнітний потік статора наводить в обмотці збудження ротора ерс. Особливо значної величини вона набуває в початковий період пуску, оскільки швидкість пересічення полем статора обмотки ротора в цей період найбільша. Внаслідок великої кількості витків обмотки збудження ця ерс досягає значно великих значень, які можуть призвести як до пошкодження ізоляції самої обмотки, так і до безпеки обслуговуючого персоналу.

Конструкція синхронних двигунів складніша, в порівнянні з короткозамкненими асинхронними двигунами. Поряд з цим, синхронні двигуни повинні мати відповідний збуджувач, або інший пристрій для живлення обмотки збудження постійним струмом.

В режимах пуску обмотка статора синхронного двигуна підключається до перетворювача частоти, що відповідає «режиму частотного пуску». Синхронний двигун входить в синхронізм починаючи із досить малих частот прикладеної напруги. Поступово він набирає більші обертові швидкості до моменту досягнення синхронізму.

Найбільше розповсюдження на практиці отримав асинхронний пуск, електрична схема якого приведена на рис.2. Слід відзначити, що

такий спосіб пуску використовується при наявності в полюсних наконечниках ротора пускової короткозамкненої обмотки.

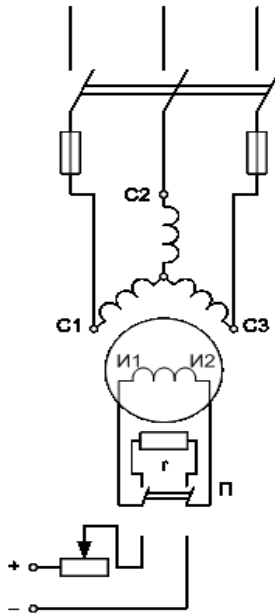


Рисунок 1.2 – Електрична схема живлення синхронного двигуна при асинхронному пуску

Для упередження таких наслідків обмотку збудження на період розгону замикають на активний опір (r) за допомогою перемикача П, що показано на рис.1.2.

Внаслідок приведених конструктивних і технічних характеристик видно, що синхронні двигуни дорожчі в порівнянні з асинхронними короткозамкненими двигунами.

1.3 Характерні риси динамічної і статичної стійкості.

З метою дослідження поставленої мети розглянемо основні положення, які призводять до погіршення роботи синхронного

електропривода в умовах експлуатації. При цьому слід розмежувати малі і великі збурення.

Малі збурення мають місце постійно. Вони пов'язані з безперервними змінами навантаження (електричного і механічного) які є наслідком характерних рис електротехнологій, регулюючих пристроїв, змінами активних опорів внаслідок зміни температури та ін. Внаслідок дії цих процесів малі збурення призводять до незначного постійного перерозподілу зв'язків між параметрами електромеханічної системи. Тому, коли розглядаємо встановлений процес, то маємо на увазі, що в системі мають місце малі фізичні збурення, які при розробці математичної моделі не враховуються. При цьому в фізичному сенсі електромагнітні процеси безперервно змінюються навколо деякого стану рівноваги, що відображає математична модель.

Великі збурення характеризуються відхиленнями параметрів, що визвані дуже різкими змінами, наприклад короткими замиканнями, комутаційними перемикаваннями, режимами дугових сталетопних печей, приводів прокатних станів та ін.

Стійкість електромагнітних і електромеханічних процесів в електроприводі повинна зберігатися при малих і великих збуреннях. В залежності від дії малих і великих збурень слід розмежувати два основних режими стійкості електромеханічної системи – статична і динамічна.

Статичною стійкістю називають здатність електромеханічної системи встановлювати попередній режим після дії малих збурень або режим наближений до номінального.

Динамічна стійкість – це здатність електромеханічної системи встановлювати попередній стан, або наближений до нього, після дії великих збурень.

Таким чином специфічним розмежуванням є результуюча стійкість яка характеризується здатністю електромеханічної системи вертатись в попередній електромагнітний та електромеханічний стан, або наближений до нього, після короткочасного асинхронного режиму синхронної машини. При цьому асинхронний режим може бути наслідком порушення статичної або динамічної стійкості електромеханічної системи. Слід підкреслити, що різницю між результуючою і динамічною стійкістю на практиці і дослідженнях об'єднують і називають синхронною динамічною стійкістю

електромеханічної системи. При цьому мається на увазі, що електромеханічна система спроможна працювати на електричні мережі загального і спеціального призначення, та інші промислові пристрої і технологічні установки.

1.4 Принципові основи побудови математичної моделі

Синхронні електроприводи слід розглядати як складні електромеханічні системи. Вони відносяться до нелінійних досить складних систем. При розробці математичної моделі не можливо відобразити в повній мірі взаємні зв'язки між навіть визначальними електромагнітними та електромеханічними параметрами. Тому при математичному аналізі слід використовувати деякі спрощення, об'єднання та узагальнення які не погіршують суть електромагнітних та електромеханічних процесів. При чому, дозволяють отримати відповідний результат який задовольняє, в межах можливих похибок, отримати кількісні результати розрахунків, або математичних залежностей. При використанні спрощень зменшується вплив нелінійностей окремих фізичних процесів і складності електромеханічної системи. Під нелінійністю окремого параметру слід розуміти його залежність від інших, наприклад залежність магнітної проникності або залежність магнітного потоку від магнітного поля розсіювання, реактивні опори в залежності від насичення магнітної системи. При математичному описанні електромагнітних процесів не лінійності взаємних зв'язків між окремими параметрами відображаються у вигляді системи нелінійних інтегро-диференціальних рівнянь, які принципово не мають аналітичного рішення. Тому при дослідженнях динамічної стійкості електромеханічних систем слід використовувати чисельні методи рішення поставленої задачі.

При дослідженні стійкості доцільно використовувати методи лінеаризації, які полягають в перетворенні системи нелінійних рівнянь до кусочно лінійних форм, які зручні для використання на практиці. В деяких випадках використовуються напівемпіричні коефіцієнти, суть яких полягає в корегуванні отриманих теоретичних результатів до конкретного типу електромеханічного об'єкту.

Важливим показником складності електромеханічного об'єкту являється багато параметричність, яка полягає в використанні множини

параметрів різної фізичної природи і, як наслідок, досить високої розмірності. Для електромеханічних систем характерною ознакою є досить високі фізичні і математичні розмірності.

Під високою фізичною розмірністю слід розуміти велику кількість та різноманітність елементів та пристроїв, що в сукупності представляють електромеханічний об'єкт, що представляє певне обмеження при аналізі отриманих результатів та їх тлумачення. В таких випадках використовувати методи еквівалентування, які полягають в об'єднанні групи параметрів одним відповідної спрямованості і призначення. При аналізі електромагнітних і електромеханічних процесів доцільно використовувати відповідні еквівалентні параметри, які об'єднують певні параметри.

При високій математичній розмірності слід розуміти велику кількість інтегро-диференціальних і алгебраїчних рівнянь, які необхідні для складання відповідної електромеханічної системи. З метою спрощення таких математичних систем слід використовувати метод умовного зниження шляхом розподілу на швидкі і нешвидкі процеси. Прикладом такого розподілу є окреме дослідження електромагнітних та електромеханічних процесів. Подальше пониження полягає в використанні спрощених математичних рівнянь, які відображають найбільш суттєві явища та процеси електромеханічної системи. Для оцінювання можливих похибок використовуються спеціальні дослідження та напівемпіричні коефіцієнти.

Під статистичними характеристиками слід розуміти графічні або аналітичні залежності між окремими параметрами, що відображають умови усталеного режиму системи при допущеннях, що дозволяють вважати ці зв'язки не залежними від поточного часу у вигляді

$$X = U(y_1, y_2, \dots, y_n).$$

Під динамічними характеристиками необхідно розуміти графічні або аналітичні залежності між окремими параметрами, що відображають умови динамічного режиму системи при допущеннях, які дозволяють вважати ці зв'язки залежними від поточного часу у наступному вигляді:

$$X = U(y_1, y_2, \dots, y_n) dy_1/dt_1, dy_2/dt_2, \dots, dy_n/dt_n).$$

Для вирішення поставленої мети розглянемо поняття статичної стійкості. Для цього скористуємося одномашинною моделлю з шинами нескінченної потужності, в якій напруга та кутова швидкість не змінюються в часі. При таких умовах аналітичний взаємний зв'язок між потужністю, модулями ерс і напруги та кутом між ними визначається за допомогою векторної діаграми напруг, ЕРС і струмів, а еквівалентний індуктивний опір представляє собою суму індуктивних опорів окремих вузлів – генератора, трансформатора та мережі, відповідно:

$$x_e = x_d + x_{T1} + x_l = x_d + x_{rc}.$$

При визначених умовах ($E_q = \text{const}, U = \text{const}$) активна потужність синхронної машини представляє собою функцію в залежності від кута, що називають кутовою характеристикою активної потужності машини навіть в складних режимах при змінних параметрах навантаження. Таким чином, кутова характеристика представляє собою геометричне місце крапок, які відповідають всім можливим значенням потужності, що передається від синхронної машини в генераторному режимі.

1.5 Математичний зв'язок між електромагнітними та електромеханічними параметрами

Математична модель електромагнітних та електромеханічних процесів в синхронному електроприводі при статичній стійкості, та отримання аналітичних залежностей між відповідними параметрами дозволить досліджувати можливі несприятливі наслідки при проектуванні та в умовах експлуатації. Як відзначалось раніше, нерівномірний перерозподіл бігучого електромагнітного поля розсіювання в просторі електричної машини призводить до постійної зміни електромагнітного моменту. Обертний момент бігучого магнітного поля, яке збуджується струмом статорних обмоток, залежить від поточного положення ротора синхронної машини. Заспокійливий механічний момент здійснюється за рахунок сил тертя, які суттєво не

впливають на механічну систему і, як наслідок, на частоту примусових механічних коливань валу. Електромагнітні і електромеханічні процеси розглядаємо на підставі наступного початкового математичного рівняння [1]:

$$L_{11} \frac{dI}{dt} + r_1 I + \frac{d \cdot (L_{12} i)}{dt} = u_1; \quad (1.1)$$

$$\frac{d(L_{12} I)}{dt} + r_2 i + L_{22} \frac{di}{dt} = u_2 \quad (1.2)$$

$$I_{\text{ин}} \frac{d^2 \theta^{\text{геом}}}{dt^2} - \frac{dL_{12}}{d\theta^{\text{геом}}} \cdot i \cdot I = M_{\text{мех}} \quad (1.3)$$

- Де: - L_{11} і L_{22} - індуктивності обмоток статора і ротора;
 - I і i - миттєві значення струмів статора і ротора;
 - r_1 і r_2 - активні опори статорної і роторної обмоток;
 - u_1 і u_2 - напруги статора і ротора;
 - L_{12} - взаємна індуктивність обмоток статора і ротора;
 - $I_{\text{ин}}$ - момент інерції ротора;
 - $\theta^{\text{геом}}$ - кут поворота ротора відносно статора;
 - $M_{\text{мех}}$ - момент механічних сил на валу ротора.

Подальші дослідження полягають у встановленні відповідних функціональних залежностей. При цьому слід враховувати, що в окремих фазах струми чередуються, а в окремі моменти часу практично відсутні. Таким чином, електромагнітні процеси в електроприводі посилюють вплив на електромеханічні процеси. Це призводить до збільшення коливань валу. На підставі фізико-математичного тлумачення таких процесів, та виконуючи відповідні перетворення, отримуємо наступну аналітичну залежність між взаємною індуктивністю та електромеханічними процесами:

$$L_{12} = \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cdot \cos \cdot k \rho \theta^{\text{Геом}}, \quad (1.4)$$

де: M_k - амплітуда гармоніки k -го порядку; ρ - число пар полюсів електродвигуна.

Виходячи з фізичного представлення взаємодії електромагнітних і електромеханічних процесів, співмножник $\rho \theta^{\text{Геом}}$ слід представити безпосередньо через кутову швидкість ротора двигуна ($\omega_{\text{эл}}$) відповідно до наступного рівняння:

$$\rho \theta^{\text{Геом}} = \omega_{\text{эл}} \cdot t + \nu(t), \quad (1.5)$$

Відповідно до умов постановки задачі

$$u_1 = U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha_1); u_2 = \text{const},$$

де: U_{1m}, ω_1 - амплітуда і кругова частота підведеної до статора напруги;

α_1 - початкова фаза напруги U_1 .

При чому будемо враховувати, що при синхронному режимі машини $\omega_{\text{эл}} = \omega_1$. Останній параметр одночасно відображає кут опередження напруги, яку підведено до статора. Тому електромагнітний момент на валу ротора зручно представити в наступному вигляді:

$$M^{\text{Э.М}} = \frac{dL_{12}}{d\theta^{\text{Геом}}} \cdot i \cdot I. \quad (1.6)$$

Звідки видно, що навіть при синусоїдальній напрузі взаємні індуктивності (L_{12}) в залежності від кута ($\theta^{\text{Геом}}$) і струмів ротора та статора (i, I відповідно) обертовий момент ($M^{\text{Э.М}}$) буде змінюватись

в часі по періодичному закону. Очевидно, що в просторі електричного двигуна протікають складні електромагнітні явища, які роблять вплив на механічні параметри навалу.

Такий характер режимів призводить до прискореного зносу підшипників, релаксацийних процесів, утворення, зрівняльних струмів і потоків, зростання місцевих втрат, нагрівів та ін.

Очевидно, що одночасний облік таких процесів приводить до досить громіздких математичних моделей, які важко використати в інженерній практиці. Тому на першому етапі досліджуємо однофазну модель.

Для підвищення ефективності електроприводів доцільно виконати комплексні дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів з урахуванням реальних умов експлуатації, режимів навантаження двигуна. Найбільш несприятливими і практично неконтрольованими є механічні коливання ротора синхронного двигуна. Це призводить до ускладнення директивного управління технологічними процесами та зниження надійності електропривода в цілому в поєднанні з суміжним електричним та електромеханічним обладнанням.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Оскільки визначальним в синхронному електроприводі є синхронний електричний двигун то для вирішення поставленої мети скористаємось приведеними в першому розділі результатами взаємних зв'язків між електромагнітними і електромеханічними процесами. При цьому скористаємось класичними фізико-математичними методами[9]. Рішення поставленої мети досягається шляхом розробки математичної моделі синхронного електропривода (без демпферних обмоток) з урахуванням динамічного перерозподілу перетворення потенціальної енергії в кінетичну і навпаки.

2.1 Динаміка перерозподілу енергії при навантаженні синхронного електропривода

При роботі електропривода відбувається постійний перерозподіл електромагнітних і електромеханічних процесів, внаслідок яких відбувається перерозподіл енергії. Потенційна енергія пов'язана з пружними силами, які пропорційні електромагнітному моменту, що діє на ротор електричного двигуна і залежить від кута навантаження. Вони спрямовані на встановлення положення рівноваги механічної системи. При досягненні рівноваги вони дорівнюють нулю. Кінетична енергія пов'язана з інерційними силами, які направлені на протидію зміни швидкості системи оскільки пропорційні прискоренню. Нерівномірний перерозподіл бігучого електромагнітного поля розсіювання в просторі електричної машини призводить до постійної зміни електромагнітного моменту. Інерційні сили залежать від динаміки механічного навантаження під час обертання ротору внаслідок дії позитивного і негативного кутового прискорення ротора. Обертний момент бігучого магнітного поля, яке збуджується статорними обмотками, залежить від поточного положення ротора синхронної машини. Слід відзначити, що заспокійливий механічний момент здійснюється за рахунок сил тертя. Вони суттєво не впливають на механічну систему. Частота власних механічних коливань валу синхронної машини складає 0,5 – 2,0 Гц. Як показано в першому розділі електромагнітні і електромеханічні процеси

задовольняють рівнянням (1.1) - (1.4). Похідними є миттєві значення струмів і напруг статора і ротора. Активні опори цих обмоток вважаємо незмінними. Взаємні індуктивності обмоток статора і ротора впливають на момент інерції ротора ($I_{ин}$) і кут повороту ротора відносно статора ($\theta^{геом}$). Внаслідок їх взаємодії має місце відповідний момент механічних сил на валу ротора синхронного електропривода.

Функціональні залежності фазних взаємних індуктивностей і кутової швидкості ротора доцільно розглядати в лінійному представленні при стаціонарному навантаженні. Це означає, що параметри (L_{11}), (L_{22}), (r_1), (r_2) суттєво не змінюються в певні миттєві проміжки часу, будемо вважати не змінними. При обертанні ротора фазні взаємоіндуктивності L_{12} будуть змінюватися в часі у вигляді періодичної функції. При стаціонарному навантаженні в усталеному режимі синхронного електропривода, взаємоіндуктивність L_{12} також змінюється по періодичному закону. При цьому при сталому живленні обертовий момент вала буде рівномірним в наслідок постійної дії по фазам збуджуючого електромагнітного поля і власної інерційності та сил тертя. При зростанні струму електродинамічні зусилля збільшуються, а при відсутності струму вони забезпечуються за рахунок інерційності механічної системи. При цьому такі електромагнітні процеси в електроприводі привносять вагомий вплив на електромеханічні процеси що призводить до збільшення коливань вала. При таких умовах взаємна індуктивність і механічний момент та множник кутової швидкості ($\rho\theta^{геом}$) і число пар полюсів (ρ -) задовольняє рівнянню (1.4). Слід відзначити, що в нашому випадку співмножник ($\rho\theta^{геом}$) доцільно пов'язувати з кутовою швидкістю ($\omega_{эл}$).

Відповідно до умов постановки наукової задачі в якості збуджуючих використовуємо наступні напруги:

$$u_1 = U_{1m} \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha_1);$$

$$u_2 = \text{const}.$$

Де: - U_{1m}, ω_1 - амплітуда і кругова частота підведеної до статору напруги;

- α_1 - початкова фаза напруги U_1 .

При синхронному режимі ($\omega_{\text{эл}} = \omega_1$) рівняння (1.6) відображає кут опередження напруги, яку підведено до статору. Очевидно, що навіть при синусоїдальній напрузі взаємні індуктивності (L_{12}) в залежності від кута ($\theta^{\text{ГЕОМ}}$) і струмів ротора та статора (i, I , відповідно) обертовий момент ($M^{\text{Э.М}}$) буде змінюватись в часі по періодичному закону. Це дає змогу виконати дослідження можливих коливань валу при встановленні статичної стійкості та інших нестационарних видів навантаження.

2.2. Коливання валу синхронного двигуна в режимах навантаження

На підставі приведених вище досліджень видно, що при незмінному моменті механічних сил на валу ротора ($M_{\text{мех}}$) кутова швидкість постійно змінюється і навіть при прикладеній синусоїдальній напрузі, мають місце коливання ротора. При зміні збуджуючих параметрів взаємні зв'язки між електромагнітними та електромеханічними параметрами суттєво ускладнюються. Це призводить до того, що взаємна індуктивність (L_{12}) в залежності від кута ($\theta^{\text{ГЕОМ}}$) змінюється по більш складному періодичному несинусоїдальному закону при зростанні механічних коливань валу ротора. На практиці такі процеси призводять до скорочення термінів роботи електроприводів або аварій. В таких випадках математична модель буде представляти собою складну систему нелінійних диференціальних рівнянь. Точність рішення цих рівнянь суттєво залежить від ступеня лінеаризації окремих параметрів та залежностей (індукції, потоків, магнітної системи, теплових процесів в обмотках і деталях, складу гармонік в струмах і напругах). На підставі

вище приведенного видно, що для вирішення практичних задач необхідно розробляти більш раціональні моделі, які задовольняють інженерній практиці з достатньою точністю. Для отримання першого наближеного рішення коливаль валу ротора другий доданок ($\nu(t)$) у формулі (1.5) відносно синхронного режиму постійний $\nu^1(t) = 0$. Додержуючись фізичної суті взаємних зв'язків між електромагнітними і механічними процесами та виконавши відповідні перетворення отримуємо наступне рівняння:

$$\rho \theta^{\text{геом}} = \omega_1 t \quad (2.1)$$

При такій умові рішення рівнянь ((1.1) – (1.2)) отримуємо відповідні системи неоднорідних диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами. При цьому пошукові періодичні функції i та I представляємо у наступному вигляді:

$$I = I_0 \sum_{n=1}^{\infty} (I_n' \cdot \sin \cdot n \cdot \omega_1 t + I_n'' \cdot \cos \cdot n \cdot \omega_1 t); \quad (2.2)$$

$$i = i_0 \sum_{n=1}^{\infty} (i_n' \cdot \sin \cdot n \cdot \omega_1 t + i_n'' \cdot \cos \cdot n \cdot \omega_1 t).$$

Подальше дослідження полягає в аналізі фізичної суті добутку $(i \cdot L_{12})$ та $(I \cdot L_{12})$.

У математичному уявленні перший співмножник представимо у наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
iL_{12} &= \sum_{k=1}^{\infty} i_0 M_k \cdot \cos \cdot k \omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cdot \cos \cdot k \omega_1 t \cdot (i_n'' \cdot \cos \cdot n \omega_1 t) \\
&= \sum_{k=1}^{\infty} i_0 \cdot M_k \cdot \cos \cdot k \omega_1 t + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} M_k i_n' [\sin(n+k) \cdot \omega_1 t + \sin(n-k) \cdot \\
&\quad \cdot \omega_1 t] + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} M_k i_n'' [\cos \cdot (n+k) \cdot \omega_1 t + \cos \cdot (n-k) \cdot \omega_1 t].
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Після перетворень та спрощенні приходимо до наступного рівняння:

$$iL_{12} = i_0 L_{12} + \sum_{j=1}^{\infty} (K_j' \cdot \sin \cdot j \omega_1 t + K_j'' \cdot \cos \cdot j \omega_1 t) + \sum_{n=1}^{\infty} M_n i_n'' \quad (2.5)$$

де:

$$K_j' = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot i_n' ; \quad (2.6)$$

$$K_j'' = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot i_n'' \quad (2.7)$$

Слід відзначити, що в першому (2.6) і другому (2.7) наближеннях коефіцієнти M з негативними та нульовими індексами вважаємо, що вони мають нескінченно малі значення. Це необхідно для отримання інженерного рішення із збереженням взаємних зв'язків між електромагнітними і механічними процесами у синхронному електроприводі.

Аналогічно отримуємо вираз для IL_{12}

$$IL_{12} = I_0 L_{12} + \sum_{j=1}^{\infty} (P_j' \sin \cdot j \omega_1 t + P_j'' \cos \cdot j \omega_1 t) + \sum_{n=1}^{\infty} M_n I_n'', \dots \dots (2.8)$$

$$P'_j = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot I'_n ; \quad (2.9)$$

$$P''_j = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{j-n} + M_{n-j} - M_{n+j}) \cdot I''_n \quad (2.10)$$

Таким чином, в загальному вигляді отримано математичні вирази, які встановлюють взаємні зв'язки між електромагнітними і електромеханічними процесами в синхронному електроприводі. В подальшому необхідно розглянути вплив характерних рис навантаження та поточні процеси. Це пояснюється тим, що саме струми збуджують бігуче електромагнітне поле у просторі електричного двигуна, яке в свою чергу призводить до обертальних процесів валу. Виходячи з фізичного тлумачення роботи синхронного електропривода розглянемо математичну модель можливих процесів і до яких наслідків вони можуть призвести в умовах експлуатації. В основу подальшого дослідження будемо використовувати результати отриманих вище результатів дослідження.

2.3 Аналітичні залежності між електромагнітними і механічними процесами

В першому розділі відзначалось, що точне рішення математичної моделі електромеханічної системи потребує досить великих витрат та розробки складних математичних залежностей у вигляді системи інтегро-диференціальних рівнянь, що значно перевищує витрати на практичне використання. Тому доцільно розробити наближену математичну модель, яка задовольняє інженерній практиці і відображає фізичні процеси в електроприводі. Таке рішення отримуємо шляхом підставлення отриманих виразів в диференційне рівняння (1.1) – (1.2). При цьому дотримуємось режиму синхронної машини ($\omega_{\text{эл}} = \omega_1$), а взаємоіндуктивності перетворимо до наступного виду:

$$\begin{aligned}
L_{11} = & \sum_{j=1}^{\infty} j_{\omega 1} (I_j' \cdot \cos j_{\omega 1} t - I_j'' \cdot \sin j_{\omega 1} t) + r_1 I_0 + \\
& + r_1 \sum_{j=1}^{\infty} (I_j' \cdot \sin j_{\omega 1} t + I_j'' \cdot \cos j_{\omega 1} t) + \\
& + \sum_{j=1}^{\infty} \left[-i_0 M_j \cdot j_{\omega 1} t + j_{\omega 1} (K_j' \cos j_{\omega 1} t - K_j'' \sin j_{\omega 1} t) \right] = \\
= & u_1' \cdot \sin \omega_1 t + u_1'' \cdot \cos \omega_1 t + \sum_{j=1}^{\infty} j_{\omega 1} (P_j' \cdot \cos j_{\omega 1} t - P_j'' \cdot \sin j_{\omega 1} t) + \\
& + r_2 \sum_{j=1}^{\infty} (i_1' \cdot \sin \omega_1 t + i_1'' \cdot \cos \omega_1 t) + L_{22} \sum_{j=1}^{\infty} j_{\omega 1} (i_1' \cdot \cos j_{\omega 1} t + i_1'' \cdot \sin j_{\omega 1} t) = u_2,
\end{aligned} \tag{2.11}$$

де: $u_1' = U_{1m} \cdot \cos \alpha_1;$
 $u_1'' = U_{1m} \cdot \sin \alpha_1;$

Подальше перетворення заключається в тому, що коефіцієнти при тригонометричних функціях з однаковими індексами j прирівнюємо і після перетворень приходимо до системи рівнянь для визначення струмів статора і ротора при відповідних умовах.

При $j=0$.

$$r_1 I_0 = 0;$$

$$r_2 i_0 = U_2,$$

$$I_0 = 0;$$

$$i_0 = \frac{u_2}{r_2}. \tag{2.12}$$

При $j=1$

$$\begin{aligned}\omega_1 L_{11} I_1' + r_1 I_1'' + \omega_1 K_1' &= u_1''; \\ r_1 I_1' - \omega_1 L_{11} I_1'' - \omega_1 K_1'' &= u_1'' + \omega_1 M_{10} i_0;\end{aligned}\quad (2.13)$$

$$\omega_1 L_{22} i_1' + r_2 i_1'' + \omega_1 P_1' = 0;$$

$$r_2 i_1' - \omega_1 L_{22} i_1'' - \omega_1 P_1'' = 0.$$

При $j \geq 2$

$$j\omega_1 L_{11} I_j' - r_1 I_j'' = j\omega_1 K_1' = 0;$$

$$r_1 I_j' - j\omega_1 L_{11} I_j'' - j\omega_1 K_1'' = j\omega_1 M_{j0} i_0;$$

$$j\omega_1 L_{22} i_j' + r_2 i_j'' = j\omega_1 P_j' = 0;$$

$$r_2 i_j' - j\omega_1 L_{22} i_j'' - j\omega_1 P_j'' = 0. \quad (2.15)$$

В такому вигляді приведені рівняння можливо використовувати при розробці математичної моделі синхронного електропривода, але необхідно виконати оцінку впливу вищих гармонік, які виникають під час синхронного пуску та інших режимах.

2.4 Вплив вищих гармонік на синхронний електропривод

Виконаємо аналіз впливу вищих гармонік на електромагнітні процеси у синхронному електроприводі. Рішення рівнянь відшукуємо з врахуванням впливу вищих гармонік до четвертого порядку. За

вказаними умовами, тільки коефіцієнти $M_1 M_3$ не дорівнюють нулю, а у виразі (2.13) і (2.14), в силу фізичної природи процесів, вони відображають тільки постійні $K_1', K_1'', K_2', K_2'', K_3', K_3'', P_1', P_1'', P_2', P_2'', P_3', P_3''$.

Ці постійні (для відповідних гармонік) приймають такий вигляд:

$$\begin{aligned} K_1' &= \frac{1}{2}(M_1 - M_3)i_2'; \\ K_1'' &= \frac{1}{2}(M_1 + M_3)i_2''; \\ K_2' &= \frac{1}{2}[(M_1 - M_3)i_1' + M_1 i_3']; \\ K_2'' &= \frac{1}{2}[(M_1 + M_3)i_1'' + M_1 i_3'']; \\ K_3' &= \frac{1}{2}M_1 i_2'; \\ K_3'' &= \frac{1}{2}M_1 i_2''. \end{aligned} \tag{2.16}$$

Постійні $P_1', P_1'', P_2', P_2'', P_3', P_3''$ отримують шляхом заміни i_n' , i_n'' на I_n', I_n'' .

Очевидно, що у лівих частинах рівнянь системи (2.14) – (2.16), (в яких праві частини не дорівнюють нулю) входять тільки I_j', I_j'' (з

непарними індексами), і i_2', i_2'' . У рівняннях з непарними індексами I_2', I_2'', i_2', i_2'' , праві частини дорівнюють нулю. Звідси витікає що при прийнятих ідеалізованих умовах та збереженні фізичного смислу електромагнітних процесів у синхронному електроприводі додержуються наступні умови:

$$i_1' = i_1'' = I_2' = I_2'' = i_3' = i_3'' = 0,$$

і

$$K_2' = K_2'' = P_1' = P_1'' = P_3' = P_3'' = 0.$$

Таким чином, для визначення шести невідомих $I_1', I_2'', i_2', i_2'', I_3', I_3''$ та їх взаємних зв'язків необхідно виконати аналіз з дотриманням фізичної природи електромагнітних процесів в електроприводі. З цією метою скористаємося наступною системою рівнянь:

$$\omega_1 L_{11} I_1' + r_1 I_1'' + \frac{\omega_1}{2} - (M_1 - M_3) i_2' = u_1'';$$

$$r_1 I_1' - \omega_1 L_{11} I_1'' - \frac{\omega_1}{2} (M_1 - M_3) i_2'' = u_1' + \omega_1 M_{10} i_0;$$

$$r_2 i_2' - 2\omega_1 L_{22} i_2'' - \frac{2\omega_1}{2} [(M_1 - M_3) I_1'' + M_1 I_3''] = 0; \quad (2.17)$$

$$3\omega_1 L_{11} I_3' + r_1 I_3'' + \frac{3\omega_1}{2} M_{12} i_2' = 0;$$

$$r_1 I_2' - 3\omega_1 L_{11} I_3'' - \frac{3\omega_1}{2} M_1 i_{12}'' = 3\omega_1 M_3 i_{30}.$$

На першому етапі відшукуємо I_3', I_3'' шляхом представлення їх через i_2', i_2'' за допомогою двох останніх рівнянь. В результаті перетворень приходимо до наступної системи рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} I_3' &= a_2 i_2' - b_2 i_2'' + c_2 i_{30}; \\ I_3'' &= b_2 i_2' - a_2 i_2'' + c_2' i_{30}, \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

де прийняті такі позначення:

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{3\omega_1 M_1}{2} \cdot \frac{3\omega_1 L_{11}}{Z_{1(3)}^2}; \\ b_2 &= \frac{3\omega_1 M_1}{2} \cdot \frac{r_1}{Z_{1(3)}^2}; \\ c_2' &= 3\omega_1 M_3 \cdot \frac{3\omega_1 L_{11}}{Z_{1(3)}^2}; \\ c_2'' &= 3\omega_1 M_3 \cdot \frac{r_1}{Z_{1(3)}^2}; \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$Z_{1(3)}^2 = r_1^2 + 9\omega_1^2 L_{11}^2.$$

Потім, підставляючи значення струмів I_3', I_3'' у два попередні рівняння системи, що розглядається, приходимо до наступних рівнянь:

$$\begin{aligned} 2\omega_1 \left(L_{22} + \frac{M_1}{2} a_2 \right) i_2' + \left(r_2 + \frac{2\omega_1 M_1}{2} b_2 \right) i_2'' = \\ = -\frac{2\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} I_2' - \frac{2\omega_1 M_1}{2} c_2' i_0'; \\ \left(r_2 + \frac{2\omega_1 M_1}{2} b_2 \right) i_2' - 2\omega_1 \left(L_{22} + \frac{M_1}{2} a_2 \right) i_2'' = \frac{2\omega_1 (M_1 + M_3)}{2} I_1'' - \\ - \frac{2\omega_1 M_1}{2} c_2' i_0'. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Приймаємо, що

$$\begin{aligned} L_{22} \frac{M_1}{2} a_2 = L_{22(2)}; \\ i r_2 - \frac{2\omega_1 M_1}{2} b_2 = r_{2(2)}, \end{aligned} \quad (2.21)$$

отримаємо

$$\left. \begin{aligned} i_2' &= a_1' I_1' - b_1' I_1'' + c_1' i_0 \\ i_2'' &= a_1'' I_1' - b_1'' I_1'' + c_1'' i_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

де

$$a_1' = -\frac{2\omega_1(M_1 - M_3)}{2} \cdot \frac{2\omega_1 L_{22}(2)}{Z_{2(2)}^2};$$

$$b_1' = -\frac{2\omega_1(M_1 + M_3)}{2} \cdot \frac{r_2(2)}{Z_{2(2)}^2};$$

$$a_1'' = -\frac{2\omega_1(M_1 - M_3)}{2} \cdot \frac{r_2(2)}{Z_{2(2)}^2};$$

$$b_1'' = -\frac{2\omega_1(M_1 + M_3)}{2} \cdot \frac{2\omega_1 L_{22}(2)}{Z_{2(2)}^2};$$

$$c_1' = -\frac{2\omega_1 M_1}{2} \cdot \left(\frac{2\omega_1 L_{22}(2)}{Z_{2(2)}^2} c_1'' + \frac{r_2(2)}{Z_{2(2)}^2} c_2' \right);$$

$$c_1'' = -\frac{2\omega_1 M_1}{2} \cdot \left(\frac{r_{2(2)}}{Z_{2(2)}^2} c_2'' - \frac{2\omega_1 L_{22(2)}}{Z_{2(2)}^2} c_1' \right);$$

$$Z_{2(2)}^2 = r_{2(2)}^2 + 4\omega_1^2 L_{22(2)}^2.$$

Підставимо (2.22) у перші два рівняння і виконаємо відповідні перетворення отримаємо наступне рішення:

$$\begin{aligned} & \omega_1 \left(L_{11} - \frac{M_1 - M_3}{2} a_1' \right) I_1' + \left(r_1 - \frac{\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} b_1' \right) I_1'' = \\ & = -\frac{\omega_1 (M_1 - M_3)}{2} c_1' i_0 + u_1''; \\ & \left(r_1 - \omega_1 \frac{M_1 + M_3}{2} a_1'' \right) I_1' - \omega_1 \left(L_{11} + \frac{M_1 - M_3}{2} b_1'' \right) I_1'' = \\ & = \left[\frac{\omega_1 (M_1 + M_3)}{2} c_1'' + \omega_1 M_1 \right] i_0 + u_1'. \end{aligned} \quad (2.23)$$

З метою приведення получених результатів досліджень математичних моделей до інженерного рішення приймаємо, що

$$L_{11} + \frac{M_1 - M_3}{2} a_1' = L_{11(1)}';$$

$$r_1' - \omega_1 \frac{M_1 - M_3}{2} b_1' = r_{1(1)}''; \quad (2.24)$$

$$r_1' - \omega_1 \frac{M_1 + M_3}{2} a_1'' = r_{1(1)}'; \quad (2.25)$$

Отримані результати у повній мірі відображають взаємні зв'язки між електромагнітними параметрами синхронного електропривода.

В цих рівняннях похідні відповідних величин визначаються відповідно наступному.

$$\left. \begin{aligned} I_1' &= \frac{r_{1(1)}''}{Z_{1(1)}^2} u_1' + \frac{\omega_1 L_{11}''(1)}{Z_{1(1)}^2} u_1'' + m_{10}' i_0 \\ I_1'' &= \frac{\omega_1 L_{11}'(1)}{Z_{1(1)}^2} u_1' + \frac{r_1'(1)}{Z_{1(1)}^2} u_1'' + m_{10}'' i_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

де:

$$m_{10}' = \frac{-\omega_1 L_{11}'' c_{1(1)}' + r_{1(1)}'' \cdot c_{1(1)}''}{\omega_1^2 L_{11}'(1) \cdot L_{11}''(1) + r_{1(1)}' \cdot r_{1(1)}''}; \quad (2.27a)$$

$$m_1'' = \frac{r_{1(1)}' \cdot c_{1(1)}' + \omega_1 L_{11}' c_{1(1)}''}{\omega_1^2 L_{11}' \cdot L_{11}'' + r_{1(1)}' \cdot r_{1(1)}''}; \quad (2.276)$$

$$Z_{1(1)}^2 = r_{1(1)}' \cdot r_{1(1)}'' + \omega_1^2 L_{11}' \cdot L_{11}'' . \quad (2.28)$$

Оскільки на практиці не можливо дотримуватись вимог Державних стандартів до якості електричної енергії то доцільно виконати дослідження впливу вищих гармонік та несинусоїдальності струму і напруги на електромагнітні та механічні параметри синхронного електропривода.

2.5 Вплив першої гармоніки статорного струму на електромагнітний момент

Вплив першої гармоніки статорного струму через напругу, підведену до статора і ротора, можна оцінити за формулами приведеними вище математичними формулами (2.23) і (2.26). При цьому другу гармоніку роторного і третю гармоніку статорного струму можливо визначити шляхом завдання відповідних напруг згідно наступної системи:

$$\left. \begin{aligned} i_2' &= B_1' u_1' + B_1'' u_1'' + A_1' i_{0'}; \\ i_2'' &= B_2' u_1' + B_2'' u_1'' + A_2' i_{0'}, \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

При цьому доцільно скористатися наступними позначеннями:

$$B_1' = a_1' \frac{r_1''(1)}{Z_{1(1)}^2} + b_1' \frac{\omega_1 L_{11}'(1)}{Z_{1(1)}^2}; \quad (2.30)$$

$$B_1'' = a_1' \frac{\omega_1 L_{11}''(1)}{Z_{1(1)}^2} - b_1' \frac{r_1'(1)}{Z_{1(1)}^2}; \quad (2.31)$$

$$B_2' = a_1'' \frac{r_1''(1)}{Z_{1(1)}^2} - b_1'' \frac{\omega_1 L_{11}''(1)}{Z_{1(1)}^2}; \quad (2.32)$$

$$B_2'' = a_1'' \frac{\omega_1 L_{11}''(1)}{Z_{1(1)}^2} + b_1'' \frac{r_1'(1)}{Z_{1(1)}^2}; \quad (2.33)$$

$$I_3' = (a_2 B_1' - b_2 B_2') u_1' + (a_2 B_1'' - b_2 B_2'') u_1'' + (a_2 A_1 - b_2 A_2 + c_2'') i_0;$$

$$I_3'' = (b_2 B_1' - a_2 B_2') u_1' + (b_2 B_1'' + a_2 B_2'') u_1'' + (b_2 A_1 + a_2 A_2 - c_2') i_0. \quad (2.34)$$

Слід відзначити, що коливання ротору синхронної машини мають механічний характер і вони залежать від співвідношення пружних і

інерційних сил. В сталих режимах співвідношення між ними не змінюються. При навантаженнях співвідношення між ними постійно змінюються. Це призводить до виводу системи із положення рівноваги в залежності від характеру електричного навантаження (дивись рис. 1.1).

Таким чином отримуємо, що коливання валу ротора синхронної машини залежать не тільки від електромагнітних процесів, а і від співвідношення пружних і інерційних сил. Поряд з цим впливає ступінь механічної обробки валу і якість підшипників, які, в свою чергу, виготовляються з певними допусками. В процесі експлуатації такі допуски зростають, що призводить до зменшення показників надійності електромеханічної системи в цілому.

В сталих режимах співвідношення між ними не змінюються. При навантаженнях співвідношення між ними постійно змінюються. Це призводить до виводу системи із положення рівноваги в залежності від характеру електричного навантаження та механічного стану.

Більш ретельний аналіз умов роботи електромеханічних систем і об'єктів показує, що дуже важливе значення набувають питання оцінки поточного технічного стану, шляхом автоматизованого аналізу.

Оскільки основне призначення електроприводів полягає в найбільш ефективному досягненні електромагнітного моменту то розглянемо його для синхронного двигуна.

Механічні коливання валу ротора синхронної машини суттєво залежать не тільки від електромагнітних процесів, а і від співвідношення пружних і інерційних сил. Ступінь останніх залежить від механічної обробки валу які виготовляються з певними допусками і в процесі експлуатації зростають.

Таким чином, в процесі експлуатації електромеханічних систем необхідно додержуватись не тільки вимог до якості електричної енергії а і до умов експлуатації та технічного обслуговування на промисловому підприємстві. Порушення таких вимог призводить до зменшення термінів роботи і надійності електромеханічної системи в цілому.

Виходячи із призначення синхронних електроприводів для забезпечення сталих обертових моментів шляхом досягненні електромагнітного моменту то доцільно розглянути вплив зовнішніх чинників на стійкість двигуна. До таких чинників відносяться коливання і відхилення напруги і струму, частоти, в першу чергу. Вони суттєво впливають на механічні коливання валу ротора синхронної машини. При

цьому такий процес відбувається при постійному перерозподілі пружних і інерційних сил. В свою чергу вони залежать від механічної обробки валу і статора які виготовляються з певними механічними допусками.

2.6 Електромагнітний момент синхронного двигуна

Для наукового дослідження необхідно використовувати математичні і комп'ютерні моделі. У першому наближенні струми в статорі і роторі, доцільно визначити скориставшись приведеними вище формулами, а електромагнітний момент по наступному рівнянню:

$$\begin{aligned}
 M^{I\Delta m} = & -\frac{\rho}{2} \left\{ M_1 \left[i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \frac{i_2'}{2} (I_1'' - I_3'') \right] + \right. \\
 & + 3M_3 \left[i_0 I_3' + \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_1''}{2} \right] \left. \right\} - \frac{\rho}{2} \left\{ M_1 \left[i_0 (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') \right] + \right. \\
 & + \frac{i_2' I_1' + i_2'' I_3''}{2} \left. \right\} + 3M_3 \left[\frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') + \frac{I_1''}{2} (i_0 + i_2'') + \right. \\
 & + \left. \frac{i_0 I_1'' + i_2' I_3'}{2} \right] \left. \right\} \sin 2\omega_1 t + \frac{\rho}{2} \left\{ M_1 \left[i_0 (I_1' - I_3') - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') - \right. \right. \\
 & - \left. \frac{i_2'' I_1'' + i_2' I_3'}{2} \right] - 3M_3 \left[\frac{I_1'}{2} (i_0 - i_2'') - \frac{i_2''}{2} (I_1' + I_3') + \right. \\
 & + \left. \frac{i_0 I_1' + i_2'' I_3''}{2} \right] \left. \right\} \cdot \cos 2\omega_1 t,
 \end{aligned} \tag{2.35}$$

Причому, для отримання більш точного рішення для складових струмів, доцільно скористатися сукупністю виразів для відповідних параметрів. Частота власних механічних коливань валу синхронної машини залежить від електромагнітного навантаження електроприводу. Слід відзначити, що заспокійливий механічний момент здійснюється за рахунок сил тертя, які суттєво не впливають на механічну систему.

Приведемо аналіз механічного коливального параметру $\nu(t)$ у другому наближенні. При цьому будемо враховувати, що цей параметр у значній мірі залежить від не стаціонарних електромагнітних процесів і від геометричних розмірів електропривода відповідно наступним рівнянням:

$$\theta^{geom} = \omega_{geom} \cdot t + \frac{\nu^{11}(t)}{p} \quad (2.36)$$

$$\frac{d^2 \theta^{geom}}{dt^2} = \frac{1}{p} \cdot \frac{d^2 \nu^{11}(t)}{dt^2}. \quad (2.37)$$

Отримані рівняння встановлюють взаємні зв'язки зміни між механічними коливаннями валу синхронного електроприводу в залежності від швидкості зміни напруги при навантаженні. Ці рівняння приведені в загальному вигляді.

Для вирішення конкретних задач і інженерних розрахунків їх доцільно перетворити з метою спрощення та конкретизації. З цією метою необхідно поставлену задачу вирішувати послідовно в залежності від очікуваної похибки при відповідних наближеннях. Для цього необхідно, додержуючись динаміки протікання електромагнітного процесу, враховувати динаміку електромеханічних процесів. З цією метою, виконаємо наступні математичні перетворення.

Отримані рівняння встановлюють взаємні зв'язки зміни між механічними коливаннями валу синхронного електроприводу в залежності від швидкості зміни напруги при навантаженні. Ці рівняння приведені в загальному вигляді та встановимо певні залежності між зовнішніми параметрами, що живлять електромеханічну систему, тв. Електромагнітними і електромеханічними процесами, що відбуваються у просторі електричної машини.

Вирішення такого завдання сприяє покращенню роботи електропривода та підвищенню надійності. Тому доцільно поставлену задачу вирішувати послідовно в залежності від відповідних початкових і граничних умов та наближеннях. При цьому, необхідно додержуючись

динаміки протікання фізичних процесів, що відбуваються в динамічному і статичному стані об'єкта та окремих вузлів. З цією метою, виконаємо наступні математичні перетворення.

Підставляючи значення $\frac{d^2\theta^{geom}}{dt^2}$, струми i, I першого

наближення і $M^{I\Delta M}$ в рівнянні моментів, отримаємо наступну систему диференціальних рівнянь другого порядку:

$$\begin{aligned}
 \frac{I}{p} \cdot \frac{d^2 v^{11}(t)}{dt^2} = & M_{\text{мех}} - \frac{p}{2} \left\{ M_1 \left[i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2} (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1'' - I_3'') \right] + \right. \\
 & + 3M_3 \left[i_0 I_3' + \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_1''}{2} \right] \left. \right\} - \frac{p}{2} \left\{ M_1 \left[i_0 (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') + \right. \right. \\
 & + \frac{i_2' I_1' + i_2' I_3'}{2} \left. \right] + 3M_3 \left[\frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') + \frac{I_1''}{2} (i_0 + i_2'') + \right. \\
 & + \frac{i_0' I_1'' + i_2' I_3'}{2} \left. \right] \left. \right\} \sin 2\omega_1 t + \frac{p}{2} \left\{ M_1 \left[i_0 (I_1' - I_3') - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') - \right. \right. \\
 & - \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_3''}{2} \left. \right] - 3M_3 \left[\frac{I_1'}{2} (i_0 - i_2'') - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \right. \\
 & + \frac{i_0' I_1' + i_2'' I_3'}{2} \left. \right] \left. \right\} \cdot \cos 2\omega_1 t.
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

Прирівнюючи постійну частину електромагнітного моменту механічних сил на валу ротора $M_{\text{мех}}$ (який його урівноважує), визначаємо початкову фазу підведеної напруги α_1 . Слід відзначити, що

при подальших дослідженнях його друге наближення доцільно позначити α_1^{11} :

$$M_{\text{мех}} = \frac{p}{2} \left\{ M_1 \left[i_0' I_1' - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \frac{i_2'}{2} (I_1' - I_3'') \right] + \right. \\ \left. + 3M_3 \left[i_0' I_3' + \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_1''}{2} \right] \right\}, \quad (2.39)$$

При дослідженнях необхідно постійну частину електромагнітного моменту механічних сил на валу ротора ($M_{\text{мех}}$) вибирати таким чином, щоб вона урівноважувала таку електромагнітну, що діє в даний момент часу. Це досягається шляхом встановлення певної початкової фази напруги, що підведена до двигуна α_1 . При подальшому розвитку електромагнітного моменту використовується його друге наближення (α_1^{11}).

У рівнянні (2.39) у першому наближенні складові струмів статора і ротора, зручно виражати через u_1', u_1'' , в яких автоматично враховується параметр α_1 . Змінна частина електромагнітного моменту визначає значення коливальної функції $v(t)$ у другому наближенні з точністю до третьої гармоніки включно, тобто $v^{11}(t)$:

$$\begin{aligned}
v^{11}(t) = & \frac{p^2}{8\omega_1^2 I_{\text{ин}}} \left\{ M_1 \left[i_0 (I_1'' - I_3'') + \frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') + \frac{i_2' I_1' + i_2'' I_3''}{2} \right] + \right. \\
& + 3M_3 \left[\frac{i_2'}{2} (I_1' + I_3') + \frac{I_1''}{2} (i_0 + i_2'') + \frac{i_0 I_1'' + i_2' I_3''}{2} \right] \left. \right\} \sin 2\omega_1 t - \\
& - \frac{p^2}{8\omega_1^2 I_{\text{ин}}} \left\{ M_1 \left[i_0 (I_1' - I_3') - \frac{i_1''}{2} (I_1' - I_3') - \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_3''}{2} \right] - \right. \\
& - 3M_3 \left[\frac{I_1'}{2} (i_0 - i_2'') - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \frac{i_0 I_1' + i_2' I_3''}{2} \right] \left. \right\} \cos 2\omega_1 t.
\end{aligned} \tag{2.40}$$

У частому (приватному) випадку, коли просторовий розподіл магнітної індукції у повітряній щілині ($M_3 = 0$) можна представити у вигляді періодичної синусоїдальної функції, коливальна функція у другому наближенні перетворюється до наступного виду:

$$\begin{aligned}
v^{11}(t) = & \frac{M_1 p^2}{8\omega_1^2 I_{\text{ин}}} \left\{ \left[i_0 (I_1'' - I_3'') + i_2' (I_1' + \frac{I_3'}{2}) + \frac{1}{2} i_2'' I_3'' \right] \sin 2\omega_1 t - \right. \\
& - \left[i_0 (I_1' - I_3') - i_2'' (I_1' - \frac{I_3'}{2}) - \frac{1}{2} i_2' I_3'' \right] \cos 2\omega_1 t \left. \right\}.
\end{aligned} \tag{2.41}$$

Отримані теоретичні дослідження і працездатність запропонованої узагальненої математичної моделі доцільно підтвердити на комп'ютерній моделі і інженерними розрахунками. Для досягнення цієї мети приводимо основні положення і підходи розробки комп'ютерної моделі. Для подальшого дослідження електромеханічних процесів в синхронному електроприводі використаємо перетворену математичну

модель в пакеті программ MatLab, який призначено для аналітичного і чисельного рішення різних математичних задач, які використаємо для моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів при статичній стійкості.

Таким чином, отримані результати математично ідеалізованого синхронного електропривода дозволяють розробити комп'ютерну модель нестационарних електромагнітних та електромеханічних процесів, а також розробити інженерну методику оцінки поточного аналізу коливань валу електричного двигуна в залежності від динаміки зміни збуджуючих зовнішніх навантажень.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ І КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Метою розробки комп'ютерної моделі є дослідження спроможності математичної моделі відображати (симулювати) електромагнітні та електромеханічні процеси при досягненні статичної стійкості електроприводів у складі синхронного двигуна в поєднанні з механічними коливаннями валу.

3.1 Схема заміщення синхронного двигуна в системі координат q-d осей

Для вирішення поставленої мети необхідною умовою є приведення отриманих теоретичних досліджень до існуючих мікропроцесорних і програмних засобів. Найбільш доцільно використовувати схему заміщення синхронного двигуна в системі координат q-d осей. На такій моделі можливо отримати результати, які пов'язані з ротором (q-d осі). Вони дозволяють одночасно моделювати (симулювати) електромагнітні і електромеханічні процеси з візуалізацією і побудовою відповідних залежностей (моменту, струму, напруги, і кутової швидкості ротора) в режимах пуску, а також визначити ступінь перерегулювання і розрегулювання. Для подальшого дослідження використаємо математичну модель пуску синхронного двигуна в пакеті програм MatLab. Цей пакет програм MatLab призначено для аналітичного і чисельного рішення різних математичних задач, а також для моделювання електротехнічних та електромеханічних систем. Моделювання таких задач можливо здійснювати завдяки застосуванням Simulink і SimPowerSystem [9].

Виходячи з фізичних процесів, які відбуваються в синхронному електроприводі, при дослідженні динамічних режимів синхронного електроприводу необхідно враховувати, що на відміну від асинхронного двигуна на ротор і синхронного двигуна розміщена обмотка збудження електромагнітного поля, а також, що в електромагнітному тлумаченні ротор явнополюсного синхронного двигуна є несиметричним, а опір магнітному потоку під полюсами значно менший.

Слід відзначити, що всі параметри ротора та його змінні приведено до статору.

Індекси змінних означають наступне:

- d, q : проекції змінних на осях d и q ,
- R, s : параметри ротора і статора,
- l, m : індуктивності розсіювання і ланцюга намагнічування,
- f, k : змінні ланцюгів збудження поля і демпферної обмотки.

Приведені на рисунках схеми заміщення відповідають наступній системі диференційних рівнянь 6-го порядку:

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_R \varphi_q$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega_R \varphi_d$$

$$V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{fd}$$

$$V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd}$$

$$V'_{kq1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq1}$$

$$V'_{kq2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq2}$$

В процесі наукового дослідження необхідно мати на увазі, що ця система рівнянь складної електромеханічної системи відповідає умовам ідеалізованої електричної машини. Якщо в процесі дослідження виникають зовнішні фактори які залишаються не помітними то результати дослідження можуть не відповідати дійсності. Тому при розробці методики експериментального дослідження необхідно ретельно розглядати і запобігати впливу не бажаних явищ і факторів.

В попередній системі диференціальних рівнянь прийнято наступні позначення:

$$\varphi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd})$$

$$\varphi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kq}$$

$$\varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i_d + i'_{kd})$$

$$\varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i_d + i'_{fd})$$

$$\varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q$$

$$\varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q$$

Модель механічних процесів описується наступними рівняннями:

$$\Delta \omega(t) = \frac{1}{2H} \int_0^t (T_m - T_e) dt - K_d \Delta \omega(t),$$

$$\omega(t) = \Delta \omega(t) + \omega_0$$

де $\Delta \omega$ - відхилення швидкості ротора від синхронної,

H - момент інерції ротора,

T_m - механічний момент,

T_e - електромагнітний момент,

K_d - коефіцієнт демпфіювання,

$\omega(t)$ - швидкість ротора,

ω_0 - синхронна швидкість (1 в.о.).

3.2. Представлення визначальних параметрів синхронного двигуна в системі Synchronous Machine_{ref} Fundamental,

Для розробки комп'ютерної моделі синхронного електропривода модель двигуна доцільно представити у відповідному вигляді. При

використанні пакета програм MATLAB модель двигуна представимо у середовищі SynchronousMachinepuFundamental, тобто. параметри двигуна задаються в системі відносних одиниць і показано на рис. 3.3.

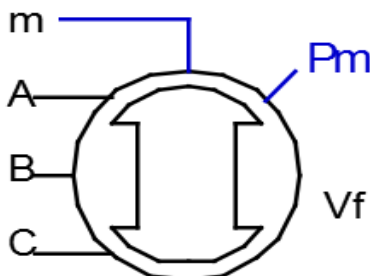


Рисунок 3.3 – Графічне представлення синхронного двигуна в системі SynchronousMachinepuFundamental

Порти моделі A, B і C являються виводами статорної обмотки синхронного електричного двигуна. На вихідному порту m формується векторний сигнал, який складається із наступних 16-ти елементів:

–1-3 -струми обмотки статора, які в свою чергу мають позначення – i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , відповідно;

–4-5 – проекції струмів статора на осі q і d, які позначено – i_q і i_d ; відповідно;

–6-8 – струми збудження електромагнітного поля i_{fd} та проекції відповідних струмів демпферної обмотки i_{kq} і i_{kd} ;

–9-10 - проекції намагнічуючого потоку на осях q і d, які мають позначення – φ_{mq} і φ_{md} ; відповідно;

–11-12 - проекції напруги статора на осях q і d, що позначено – V_q і V_d ; відповідно;

–13 – відхилення кута ротора $\Delta\theta$ (кута ступеня навантаження δ);

–14 – кутова швидкість ротора ω_r ;

–15 – електромагнітна потужність (P_e);

–16 – відхилення швидкості ротора $d\omega$.

Для зручності виконання дослідження та аналізу отриманих результатів доцільно змінні, які характеризують електромагнітні і електромеханічні процеси в двигуні, із вихідного вектора

використовувати бібліотеку SimPowerSystems. При чому, для цього передбачено використовувати блок MachinesMeasurementDemux.

Сигнал, який пропорційний механічній потужності на валу електропривода, подається на вхідний порт P_m , а на вхідний порт V_f одночасно подається сигнал, який використовується в якості задаючого напруги обмотки збудження електромагнітного поля.

Методика моделювання полягає в наступному. Пуск синхронного двигуна умовно можливо здійснювати в два етапи.

На першому етапі кутова швидкість доводиться до підсинхронної за рахунок використання асинхронного моменту. Ступінь постійності кутової швидкості та скольження у сталому режимі асинхронного режима визначається в точці перетину кривих асинхронного моменту і моменту навантаження.

На другому етапі здійснюється втягування електричного двигуна в синхронізм за рахунок моменту обумовленого процесом збудження, або за рахунок реактивного моменту. Це обумовлено різницею між магнітними опорами по продовжній і поперечній осям ротора.

Розділення процесу пуску на два етапа умовне, тому що в деяких випадках вхід в синхронізм починається при скольженні більше, чим скольження сталого асинхронного режиму. Незалежно від цього результати аналітичних і експериментальних досліджень показують, що більш благоприйнятні умови для втягування в синхронізм складаються при меншому значенні скольження.

Таким чином, час пуску синхронного двигуна і умови входу в синхронізм визначаються характером залежності його асинхронного моменту від скольження.

Синхронна машина представляє собою складну електро-механічну систему, яку досить складно представити для моделювання через наявність на роторі однофазної обмотки збудження і, в окремих випадках, пускової (демпферної) обмотки. Існують різні моделі і схеми заміщення, однак при дослідженнях не враховують другорядні явища і визнають:

- магнітне поле в зазорі розглядається як плоскопаралельне;
- якорь береться гладким;
- не враховується скривлення поля;
- крива розподілу поля розсіювання вважається синусоїдальною;
- магнітна вісь обмотки збудження співпадає з прокільною вісю;

- зневажають полями вищих гармонік і моментами від цих полів;
- розподіл струмів у демпферній обмотці синусоїдальний;
- не враховується вплив вихрових струмів і гістерезиса;
- не враховується вплив насичення магнітної системи;
- фазні обмотки мають однакові параметри.

Внаслідок специфічної форми полюсного наконечника і робочої точки, яка знаходиться на перетині характеристики холостого ходу відхилення від синусоїдальності напруги не перевищують 5%.

Доцільно звернути увагу на кількість параметрів і фізичних величин використовуються одночасно і вони приймають різні чисельні значення при відтворенні процесу, що досліджується.

3.3 Спеціалізовані засоби забезпечення статичної стійкості

На підставі приведених вище результатів досліджень видно, що в синхронному електроприводі протікають досить складні електромагнітні і електромеханічні процеси в сталих статичних і динамічних режимах., При цьому вони суттєво посилюються в режимах пуску і досягнення синхронізму. Тому на практиці використовуються спеціальні методи пуску синхронних електроприводів. Поряд з цим, під час роботи відхилення і коливання напруги, що відноситься до малих збурень, від номінального значення погіршують умови роботи двигуна і техніко-економічні показники [1-6]. Такі збурення впливають на статичну стійкість електропривода, яка є визначальною умовою надійності і ефективності роботи спроможності всієї електромеханічної системи [1, 3-5,].

Надійність та ефективність синхронних електроприводів сприяє забезпеченню оптимального використання електричної енергії при перетворенні її в інші види, а також забезпечення стабільності електротехнологічних процесів. Доцільно мати на увазі, що для забезпечення стабільності технологій промисловості важливу роль відіграє техніка досягнення двигуна синхронної обертової швидкості. Як видно із 3.4 живлення синхронного двигуна здійснюється у певній послідовності шляхом використання автоматизованої системи регулювання збудження магнітної системи (АРВ). В синхронному

функціональних блоків і підключено до трансформатора власних потреб змінної напруги. За його допомогою змінна трифазна напруга перетворюється в стабільну постійну напругу ± 12.6 В. (При відмові БЖ виконується автоматичне переключення на резервне джерело. В блоці установки напруги (БУН) формується відповідна величина уставчої напруги яка забезпечує поточний режим.

Управління може здійснюватись в ручному режимі (на панелі БУН) або дистанційно (за допомогою ключа на блочному щиті управління). Блок напруги (БН) формує відповідні сигнали для відключення напруги статора від раніше встановленого значення и першої похідної напруги статора.

Блок реактивного струму БРТ-1 формує сигнал, який пропорційний реактивній складовій струму статора генератора для забезпечення заданого статизму регулювання. У випадку, коли генератор працює на загальні шини мережі, то статизм регулювання задається від'ємним (-), а при роботі блока «генератор—трансформатор» - додатнім(+).

Блок реактивного струму БРС-2 формує сигнал, який пропорційний реактивної складової групи генераторів (або окремих двигунів), що об'єднані шинами генераторної напруги. Цей сигнал компенсує падіння напруги в підвищуючому трансформаторі і забезпечує встановлення необхідного режиму статизму. Так забезпечується режим стійкої роботи двигуна, або групи двигунів при низькому статизмі. Блок струмів (БС) виробляє напругу, яка пропорційна для забезпечення струмів ротора і статора, які одночасно використовуються для обмеження перевантаження.

Поряд з наведеним, в БС формується сигнал стабілізації по похідній струму ротора. Теплові перевантаження (перегрівання) закладені в блоці індикації перевантаження (БП). В залежності від величини (глибини) перевантаження БП відраховує відповідну допустиму витримку по часу дії і видає сигнал про перегрів в машині.

Блок обмеження струму ротора (БОР) здійснює обмеження максимального струму ротора і одночасно впливає на систему управління тиристорними блоками, а також зменшує уставку напруги при тепловому перевантаженні генератора до допустимого рівня. Форсування збудження при зниженні напруги статора нижче заданої уставки забезпечує блок форсування (БФ). Таким чином забезпечується високий режим динамічної стійкості.

Блок обмеження мінімального збудження (ОМЗ) призначено для захисту торцевих зон статора від недопустимих теплових перевантажень (перегріву). В ньому встановлено межі допустимих режимів в координатах активної і реактивної складових струму статора. При порушенні режимів роботи генератора за нормовані межі без інерційно зростає уставка напруги статора. Якщо в конструкції двигуна не передбачено перегрів торцевих зон, то межі ОМЗ можливо перебудувати на обмеження внутрішніх кутів генератора (обмеження по стікості).

Сигнали стабілізації також пропорційні першій похідній частоти напруги. Вони формуються в блоці частоти і захисту (БЧЗ). При одночасному зростанні напруги статора, частоти і похідної частоти, що характерно при обривах в мережі, вихід БЧЗ блокується з метою упередження ложного форсування. Узгодження напруги генератора до напруги мережі при високій точності автоматичного регулювання синхронізації та самосинхронізації здійснюється блоком підгонки (ПУН).

Сумування та підсилення сигналів регулювання та їх стабілізація проводиться за допомогою блоку (БУ). Його вихідний сигнал передається безпосередньо на вхідні канали АРЗ. БУ одночасно виконує гальванічну розв'язку між ланцюгами АРЗ та системи управління тиристорним перетворювачем (СУТ) [8].

Таким чином, використання такої системи дозволяє найбільш оптимально використовувати синхронний електропривод як в умовах експлуатації, так і в режимах пуску, а також дотримувати певного синхронізму. Це доцільно використовувати при вирішенні інженерних задач та при дослідженні електромагнітних та електромеханічних процесів в синхронному електроприводі.

На практиці досить часто виникає необхідність передбачити технічний стан синхронного електропривода при змінних навантаженнях та погіршенні показників якості електричної енергії. Тому доцільно такі процеси досліджувати на математичних і комп'ютерних моделях.

3.4 Фізико-математична модель синхронного електропривода при статичній стійкості

Невід'ємною технічною складовою синхронних електроприводів є комплекс засобів та пристроїв для забезпечення стабілізації і

регулювання струму збудження (джерело постійного струму для живлення обмотки збудження).

Струм збудження повинен регулюватись з метою забезпечення оптимальних режимів синхронної машини за допомогою АРЗ. Одночасно АРЗ сприяє забезпеченню статичної і динамічної стійкості при різних умовах експлуатації електропривода. Узагальнена електрична схема синхронного електропривода у складі системи збудження приведена на рис. 3.6.

Необхідно відзначити, що важливою функцією системи збудження є забезпечення форсування збудження шляхом збільшення напруги до допустимих значень нормативно-технічною документацією та державними стандартами в мінімальні терміни часу. Тому порівняння характеристики різних систем збудження необхідно розглядати в режимі форсування збудження.

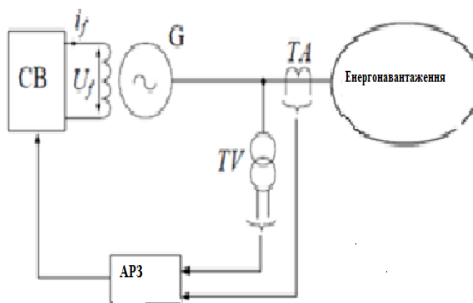


Рисунок 3.6 - Узагальнена електрична схема синхронного електропривода у складі системи збудження

В якості початкових умов використовуються характеристики холостого ходу синхронної машини. При таких умовах струм збудження та ЕРС машини змінюються пропорційно в нормованому вигляді (відносних одиниць). При синхронній ЕРС (E_q) струм збудження відповідає наступному рівнянню:

$$E_q = E_{q0} + K_{0U}(U_{Г0} - U_r) \quad (3.1)$$

Де E_{q0} – установче значення ЕРС;

- $U_{Г0}$ – установче значення напруги;

- K_{0U} – коефіцієнт підсилення АРЗ відносно напруги машини.

При досить великих значеннях коефіцієнта (100 – 300) синхронна ЕРС E_q генератора змінюється в залежності від навантаження, що може призводити до мах або мін обмеження по струму збудження. Похідний усталений режим відповідає точці $ас$ з координатами P_0, δ_0 при відповідних значеннях ЕРС, які використовуються в якості початкових. Відносно Цього режиму слід збільшувати або зменшувати активну потужність синхронної машини. В результаті отримуємо низку відповідних залежностей потужності від кута як показано на рис. 3.7.

За межами граничних меж $g_{нi}g_{в}$ кутова характеристика співпадає з граничними внутрішніми характеристиками, які можуть відповідати E_{qmin} і E_{qmax} граничним значенням синхронної ЕРС. Максимум P_M зовнішньої характеристики зміщується вправо відносно екстремальних значень.

Особливо цікаво аналізувати зовнішню характеристику в межах m' і m , які відповідають екстремальним значенням потужності на одній із внутрішніх і зовнішній характеристиках. В інтервалі кутів $0 - 90^\circ$ по всім внутрішнім характеристикам потужності задовольняється нерівність $dP/d\delta > 0$, тому система забезпечується стійкістю.

В межах $m' m$ зовнішньої характеристики похідну потужності по куту, визначаємо внутрішніми характеристикам, яка має від'ємне значення. Тому статична стійкість системи може забезпечуватись тільки за допомогою АРЗ. При встановлених значеннях коефіцієнта підсилення K_{0U} АРЗ машини напруга U_r не залишається сталою.

При цьому на синхронному реактивному опорі x_d може бути деяке прирощення опору Δx , при якому ЕРС E_x зберігає практично постійне значення. Таку обставину доцільно використовувати при інженерних розрахунках. Слід відзначити, якщо збільшити K_{0U} від нуля до нескінченності, то опір Δx буде змінюватись в межах $x_d \geq \Delta x \geq 0$. При інженерних розрахунках такі випадки доцільно враховувати в залежності від поставленої мети і можливої похибки.

Для приводів з АРЗ СД (сильної дії) приймають $E_x = U_r = \text{const}$, $x_r = \Delta x = 0$, а для генераторів з АРЗ ПД (пропорційної дії) використовують математичну модель з дотриманням умов $E_x = E' = \text{const}$, $x_r = \Delta x = x'_d$. Очевидно, що при відсутності АРЗ в генераторі

буде достатнім врахування моделі з дотриманням умов $E_x = E_q = \text{const}$, $x_r = \Delta x = x_d$.

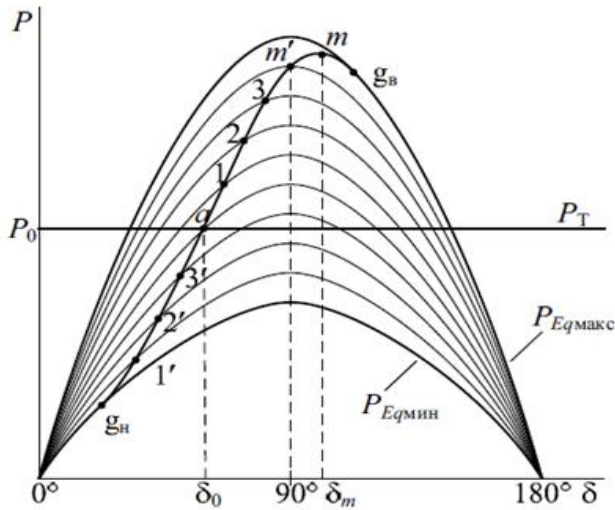


Рисунок 3.7 - Кутова характеристика синхронної машини при зміні синхронної ЕРС в залежності від режиму навантаження.

В обох видах АРЗ реагує на певні зрушення і в якості основного параметра використовують відхилення напруги від заданого значення ΔU . По ньому побудовано зворотній зв'язок АРЗ. Це дозволяє оперативно і досить точно керувати відповідними режимами з метою покращення статизму синхронного електропривода [8 - 10].

3.5 Початкові і граничні умови забезпечення статичної стійкості синхронної машини

Системи АРЗ забезпечують регулювання струму збудження шляхом керування E_q регулятором, який підключається до обмотки збудження ЕРС. (E_{qe}). При перехідних процесах в машині формуються вільні з.р.с. ($E_{qсв}$). Таким чином, в якості початкової умови дослідження перехідного електромагнітного процесу доцільно використовувати наступне рівняння:

$$\Delta E q = \Delta E q_{\text{св}} + \Delta E q_e \quad (3.2)$$

Перехідний електромеханічний процес при малих відхиленнях $\Delta\delta$ задовольняє наступному рівнянню:

$$T_j \frac{d^2\delta}{dt^2} + P_d \frac{d\delta}{dt} = P_0 - P_{\text{эл}} = P_0 - P_m \sin\delta. \quad (3.3)$$

Разкладаючи $P_m \sin\delta$ в ряд Тейлора по достатньо малим значенням $\Delta\delta$ в межах δ_0 (вважаючи $\delta = \Delta\delta + \delta_0$) і залишаючи тільки нульовий і перші наближення (лінійна задача) приходимо до наступного виразу:

$$T_j p^2 \Delta\delta + P_d p \Delta\delta = P_m \sin\delta_0 - P_m \sin\delta_0 - \frac{dP}{d\delta} \Delta\delta = -\Delta P \quad (3.4)$$

Де ΔP – відповідні межі в яких може змінюватись потужності при відхиленнях кута на $+\Delta\delta$.

Після перетворення рівняння електромеханічного процесу доцільно представити у наступному вигляді [8 - 12]:

$$\Delta P = -T_j p^2 \Delta\delta - P_d p \Delta\delta. \quad (3.5)$$

Таким чином, для дослідження перехідного електромеханічного процесу отримано два рівняння з 5-ма невідомими ($\delta, E^{\sim}q, E q, \Delta P, U_{\Gamma}$). Очевидно, що для рішення математичної моделі стійкості необхідно доповнити ще трьома рівняннями. Для цього таке саме значення потужності ΔP представимо у вигляді функційних залежностей е.р.с. $E^{\sim}q, E q$ і напруги U_{Γ} :

$$\Delta P_1 = \varphi(E q, \delta) = \frac{\partial P_{E q}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial P_{E q}}{\partial E q} \Delta E q;$$

$$\Delta P_2 = \varphi(E^{\sim}q, \delta) = \frac{\partial P_{E^{\sim}q}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial P_{E^{\sim}q}}{\partial E^{\sim}q} \Delta E^{\sim}q;$$

$$\Delta P_3 = \varphi(U_{\Gamma}, \delta) = \frac{\partial P_{U_{\Gamma}}}{\partial \delta} \Delta\delta + \frac{\partial P_{U_{\Gamma}}}{\partial U_{\Gamma}} \Delta U_{\Gamma};$$

Підставивши значення ΔP та E^q , після елементарних перетворень отримуємо три основних рівняння, які необхідні для подальшого дослідження:

$$\begin{aligned} [T_j p^2 + c1(p)]\Delta\delta + b1\xi(p)\Delta E^q + b1\gamma(p)\Delta U_\Gamma &= 0; \\ [T_j p^2 + c2(p)]\Delta\delta + b2\Delta E^q + 0 &= 0; \\ [T_j p^2 + c3(p)]\Delta\delta + 0 + b3\Delta U_\Gamma &= 0. \end{aligned} \quad (3.10)$$

В цих рівняннях прийнято наступні позначення:

$$\begin{aligned} c1(p) &= c1 + P_d p; \quad c1 = \frac{\partial P_{Eq}}{\partial \delta}; \quad b1 = \frac{\partial P_{Eq}}{\partial E^q}; \\ c2(p) &= c2 + P_d p; \quad c2 = \frac{\partial P_{E^q}}{\partial \delta}; \quad b2 = \frac{\partial P_{E^q}}{\partial E^q}; \\ c3(p) &= c3 + P_d p; \quad c3 = \frac{\partial P_{U_\Gamma}}{\partial \delta}; \quad b3 = \frac{\partial P_{U_\Gamma}}{\partial U_\Gamma}. \end{aligned}$$

Всі коефіцієнти при похідних потужностях залежать від E^q , E^q , U_Γ по колу. Коефіцієнти b – представляють собою приватні похідні. Коефіцієнти $c1, c2, c3, b1, b2, b3$ – постійні в данному режимі дослідження (в межах δ_0), але в інших режимах вони можуть суттєво змінюватись. При цьому активний опір статора приймає досить малі значення ($r_{ст} \approx 0$). Системи однорідних рівнянь (3.10) - (3.11) не мають однозначного рішення, що відповідає постановці завдання статичної стійкості синхронного електропривода. Це пов'язано з відсутністю конкретних збуджуючих параметрів. Якщо, наприклад, параметр режиму ($\Delta\delta$) можливо представити у вигляді $\Delta\delta = \frac{0}{D_1(p)}$, то визначник систем (3.9) - (3.11) $D_1(p) = 0$ можливо представити у вигляді відповідного полінома. Він буде як характеристичне рівняння, по кореням якого можливо встановити ступінь стійкості електромеханічної системи і візуалізувати відповідні параметри, що відображають динаміку режиму.

3.6 Умови відповідності математичної моделі фізичним процесам при статичній стійкості синхронного електропривода

Дослідження на стійкість доцільно проводити на підставі методу Гурвіця. Цей критерій формується таким чином, щоб електромеханічна система у складі пристрою автоматичного регулювання, задовольняла вимогам стійкості. З математичної точки зору необхідною і достатньою умовою є, формування всіх визначників $\Delta_1, \Delta_2, \dots$, які входять у характеристичні рівняння системи до n -го порядку. Поряд з цим вони повинні приймати позитивні значення

$$a_0 > 0.$$

При таких умовах матриця Гурвіця Δ_n не впливає, так як з рівняння видно, що

$$\Delta_n = a_n \Delta_{n-1} \text{ і при } \Delta_{n-1} > 0$$

завжди отримуємо

$$\Delta_n > 0.$$

Методологічний підхід використання методу Гурвіця n -го порядку полягає в наступному [8 - 9]:

- по головній діагоналі визначаються всі коефіцієнти від a_1 до a_n в порядку зростання відповідних індексів;
- доповнюються всі стовбці визначальника уверх від діагоналі коефіцієнтами з послідовно зростаючими, а вниз - з послідовно зменшуваними ідексами;
- визначають найбільший порядок визначальника Гурвіця, та ступінь характеристичного рівняння;
- там де індекси приймають значення більше пі менші нуля, слід ставити нулі, з метою збереження відповідності математичної моделі фізичній суті електромеханічної системи;
- знаходиться останній визначник - $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$ (на підставі передостаннього Δ_{n-1}).

Відповідно до нашого завдання при використанні метода Гурвіця необхідно додержуватись наступного.

Необхідною і достатньою умовою є відсутність аперіодичної нестійкості, що відображається позитивними значеннями всіх коефіцієнтів характеристичного рівняння в тому числі і діагональних мінорів матриці Гурвіця і передостаннього, Δ_{n-1} , визначальника.

При додержанні таких умов та відсутності демпферного ефекту ($P_d = 0$) характеристичне рівняння перетворюємо до виду, який зручний для розробки математичної і комп'ютерної моделей

$$T_e T_j T_d p^4 + T_j (T_d + T_e) p^3 + \left(T_j + T_d T_e c_2 + \frac{b_1}{b_3} K_{0U} T_j \right) p^2 + (T_d c_2 + T_e c_1) p + c_1 + \frac{b_1}{b_3} K_{0U} c_3 = 0 \quad (3.12)$$

або

$$a_0 p^4 + a_1 p^3 + (a_2 + \Delta a_2) p^2 + a_3 p + a_4 + \Delta a_4 = 0 \quad (3.13)$$

Аналізуючи вище приведені результати дослідження та додержуючись фізичного тлумачення електромагнітних та електромеханічних процесів в синхронному електроприводі очевидно, що завжди $a_0 > 0$, якщо $T_d > 0$; $a_1 > 0$, якщо $T_d > 0$ або $T_d < T_e$ при $T_d < 0$; $a_2 + \Delta a_2 > 0$, якщо $c_2 > 0$ або при $c_2 < 0$ отриуємо

$$\left(1 + \frac{b_1}{b_3} K_{0U} \right) T_j > T_d T_e c_2. \quad (3.14)$$

Слід відзначити, що динаміка процесу завжди буде відповідати дійсному при $c_2 > 0$. Значення a_3 буде > 0 , якщо

$$T_d c_2 > T_e c_1 \text{ або } c_2 > \left(\frac{T_e}{T_d} \right) |-c_1|,$$

В цьому випадку позитивне значення c_2 більше від'ємного c_1 по модулю помноженому на $\frac{T_e}{T_d}$.

Додержуватись приведених вище умов і критеріїв зручно за допомогою автоматизованих систем регулювання режимами синхронного електропривода.

Автоматизоване регулювання збудження синхронного двигуна в математичній моделі відображається в коефіцієнтах доповнення Δa довідповідних коефіцієнтів ав характеристичному рівнянні. При регулюванні методом пропорційної дії з'являються два доповнення Δa_2 і Δa_4 .

Перше забезпечує переміщення по характеристиці потужності P_{E^*q} до її максимального значення (точки $c_2 = 0$). Друге визначає можливість встановлення відповідних корегувань коефіцієнта підсилення K_{0U} , що відображається в наступному рівнянні:

$$a_4 + \Delta a_4 = c_1 + \frac{b_1}{b_3} K_{0U} c_3.$$

При від'ємних значеннях c_1 слід враховувати, що

$$\frac{b_1}{b_3} K_{0U} c_3 \geq |c_1|.$$

Фізично це означає, що коефіцієнт підсилення (забезпечуючий великі значення потужності P_{E^*q} при $c_1 < 0$, $c_2 > 0$), повинен приймати значення більші (або рівні) деякому

$$K_{0U_{\min}} = |c_1| \frac{b_3}{b_1} c_3.$$

Чим меншим буде K_{0U} , тим менше можливо переміщення по характеристиці (при $E^*q = \text{const}$) до точки $c_2 = 0$. При цьому при $K_{0U} = 0$ система буде працювати як нерегулюєма відповідно до характеристики $P_{E^*q} = \text{const}$, а напруга буде зменшуватись при одночасному зростанні навантаження.

При $K_{0U_{\max}} = 0$ видно, що аперіодичне порушення стійкості буде формуватись при $c_1 = 0$. В іншому обмежуючому випадку, приймаючи $K_{0U_{\max}} = \infty$, рівняння перетворюється до

$$T_j p^2 + c_3 = 0,$$

де корні рішення дорівнюють

$$p_{1,2} = \sqrt{-c_3/T_j} = \pm j\sqrt{c_3/T_j}.$$

Це означає, що система досить стійка при $c_3 = 0$ (формально, оскільки не враховується затухання процесу внаслідок чого система знаходиться на межі стійкості).

При $c_3 = 0$ має місце обмежений режим. При $K_{0U} = \infty$ напруга двигуна (генератора) U_r підтримується постійною при всіх можливих коливаннях і робочий режим підтримується відносно постійного значення. Це дуже зручно для реальної роботи електропривода в умовах експлуатації.

Аналіз досліджень показав, що фізично, теоретично і в умовах експлуатації (навіть при сприятливих умовах і режимах), що регулятори пропорційної дії не забезпечують стійку роботу системи при $K_{0U} = \infty$. Тому для кожної системи необхідно визначатися з певними обмежуючими межами значень $K_{0U\text{макс}} \ll K_{0U\infty}$. Це пояснюється тим, що при перетині через нуль в передостанньому визначальнику Гурвіца фізично можливі коливальні, які відносяться до досить нестійких процесів.

Значення $K_{0U\text{макс}}$ залежить від режиму системи в цілому і параметра T_e . Зростання останнього призводить до збільшення можливого $K_{0U\text{макс}}$. Тому для забезпечення надійності значення коефіцієнта підсилення повинно підтримуватись в межах між $K_{0U\text{мин}}$ і $K_{0U\text{макс}}$, відповідно до $K_{0U\text{мин}} < K_{0U} < K_{0U\text{макс}}$.

Відповідно до фізичного тлумачення можливо визначити умови обмеження потужності, що передається, і вплив відповідних теоретичних коефіцієнтів. Вони полягають в наступному:

- при $K_{0U} \approx 0$ система буде нерегульованою в деяких межах і обмеження передаваної потужності визначається точкою c_1 , а напруга суттєво зменшується при зростанні навантаження;

- при $0 < K_{0U} < K_{0U\text{макс}}$ мають місце деякі значення коефіцієнтів, при яких обмежуюча потужність визначається точкою c_2 , а напруга зменшується по мірі збільшення навантаження порівняно повільніше;

- при $K_{0U} < K_{0U\text{макс}}$, але незначно більших, в порівнянні з випадком коли напруга підтримується не змінною, можливе примусове розкачування системи раніше, що практично досить небезпечно;

- при $K_{0U} \approx \infty$ підтримка напруги буде досить оптимальним, але при зростанні навантаження до умов, що відповідають обмеженню (c_3), можливе формування коливальної нестійкості, що призведе до аварійної ситуації, або низки небажаних наслідків.

Приведений аналіз показав, що практично регулятор пропорційної дії повинен функціонувати при такому коефіцієнті підсилення K_{0U} , який наближено відповідає потужності, що передається, при е.р.с. $E_q = \text{const}$, яку прикладено в схемі заміщення генератора за опором K_{Xd} , де $K > 1$ має значення, яке залежить від конкретних умов навантаження та режимів [8 - 11].

Таким чином, при теоретичних дослідженнях автоматизовані системи пропорційної дії доцільно представляти в схемі заміщення E_q , що прикладена за K_{Xd} . Це відповідає наближено умові $E_q \approx E$. Слід відзначити, що такий підхід є досить наближеним і при їх кваліфікованому підборі K можливо отримати результат з похибкою, в межах 5-и % по потужності [9].

Автоматизовані системи регулювання збудження сильної дії (АРЗ СД) в порівнянні з іншими мають наступні переваги:

- мають високі коефіцієнти підсилення по основному каналу регулювання відхилення ΔU і тому забезпечують підтримання відповідної напруги на виводах генератора з досить високою точністю;
- для формування управляючого впливу на систему збудження використовуються декілька характеристичних параметрів, що забезпечують певні режими в перехідних та сталих режимах[8-10];
- вони дозволяють дотримуватись певних режимів навантаження з системами збудження досить потужних гідро- і турбогенераторів та форсування збудження в аварійних режимах, демпфування коливальних процесів при зовнішніх завадах, обмеження мінімального і максимального струму ротора, а також забезпечують інші нестандартні режими та умови експлуатації [5].

Структурна схема регулятора АРЗ-СД показана на рис. 3.8. На схемі система збудження (ТЗ) поєднана з системою управління тиристорами (СУТ). Визначальними є регулювання по відхиленню напруги (ΔU), по похідній ($\frac{du}{dt}$), каналу обмеження мінімального струму збудження ($\Delta I_{\text{возб}}$) і канал по струму статора для забезпечення статизму регулювання Канал

по ΔU прийнято називати основним, а формування допоміжних дій – каналами стабілізації.

Останні забезпечують стабілізацію режимів та їх стійкість. Доцільно використовувати безпосереднє регулювання кута δ , який відображає положення ротора відносно вектора напруги.

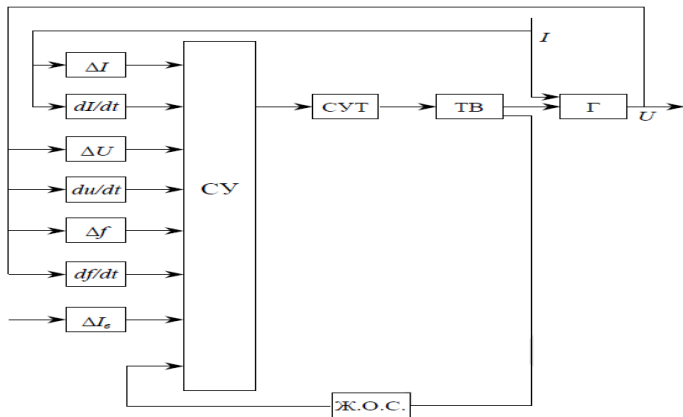


Рисунок 3.8 – Структурна схема автоматизованого регулятора системи збудження синхронного двигуна сильної дії

В узагальненому випадку при електромеханічному перехідному процесі частота вектора ЕРС (ω_r) не дорівнює частоті вектора напруги електромеханічної системи (ω_c) і поточне значення кута δ визначається по наступному виразу:

$$\delta = \int (\omega_{\Gamma} - \omega_{\text{C}}) dt + \delta_0 = \delta \int \Delta \omega dt + \delta_0 \quad (3.15)$$

де δ_0 – початкові значення кута.

Перша і друга похідні кута (швидкість і прискорення), відповідно задовольняють рівнянням

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = 2\pi\Delta f,$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = 2\pi \frac{d\Delta f}{dt}. \quad (3.16)$$

Тому в каналах стабілізації використовується ступінь відхилення обертової частоти і її першої похідної.

Поряд з цим, використовуються перша похідна напруги на виводах двигуна і перша похідна струму ротора оскільки вона характеризує швидкість змінення відхилень напруги, що живить двигун.

3.7 Математична модель синхронного електропривода при автоматизованому забезпеченні статичної стійкості

Як показано вище, режими статичної стійкості синхронного електропривода зручно досліджувати за допомогою автоматизованих систем регулювання збудженням, вони забезпечують відносно стабільні режими навантаження, що сприяє можливості отримання чисельних значень відповідних параметрів та взаємних аналітичних зв'язків між ними. Умовна і принципова схема такої моделі повина відображати поєднання синхронного електропривода з електротехнічними об'єктами системи електропередачі та іншими елементами які можуть впливати на результати дослідження.

Відповідно до умов ідеалізації електромагнітні процеси, що відбуваються в електромеханічній системі повинні задовольняти наступним рівнянням:

$$\frac{T_j}{\omega_0} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{P_d}{\omega_0} \cdot \frac{d\delta}{dt} = P_0 - \frac{E_q \cdot U_c}{x_c} \cdot \sin \delta \quad (3.17)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{T_j} \cdot \left[-\frac{P_d}{\omega_0} \cdot \frac{d\delta}{dt} + P_0 - \frac{E_q \cdot U_c}{x_c} \cdot \sin \delta \right] \quad (3.18)$$

Де:

$$y_1 = \delta, \quad y'_1 = y_2 = \frac{d\delta}{dt}, \quad y_3 = E_q,$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = -K_1 \cdot y_2 + K_2 - K_3 \cdot y_3 \cdot \sin y_1$$

$$K_1 = \frac{P_d}{T_j},$$

$$K_2 = \frac{\omega_0}{T_j} \cdot P_0,$$

$$K_3 = \frac{\omega_0}{T_j} \cdot \frac{U_c}{x_c},$$

Отримані математичні рівняння в повній мірі відповідають фізичному тлумаченню протікання електромагнітних процесів оскільки вони є визначальними при моделюванні, проектуванні і розробці, наукових дослідженнях та ін. Тому в подальшому доцільно розробити певні методологічні підходи для інженерних розрахунків.

3.8 Похідні дані та інженерний розрахунок визначальних параметрів

Для розробки методологічних підходи та інженерних методів розрахунку електромагнітних процесів використаємо конкретний синхронний двигун, що сирійно виробляється та використовується в промисловості.

Похідні дані синхронного двигуна з наступними параметрами:

- потужність $P_{2N} = 4,5 \text{ кВт};$
- напруга $U_N = 380 \text{ В};$
- частота $f = 50 \text{ Гц};$
- кутова швидкість $n_N = 1500 \text{ об/мин.}$

Визначимо величину коливальної функції $\nu^{11}(t)$ для випадків синусоїдального розподілу магнітної індукції у повітряній щілині і несинусоїдального розподілу магнітної індукції у повітряній щілині.

У випадку синусоїдального розподілу магнітної індукції у повітряній щілині значення коливальної функції $\nu^{11}(t)$ визначається на підставі формули для магнітного моменту, причому

$$M_1 = \frac{8}{\pi^2} \frac{\omega_1 \omega_2 p}{R_M} \cdot k_{\omega_1} \cdot k_{\omega_2},$$

де ω_1 - число витків на пару полюсів у статорі

$$\omega_1 = 196;$$

ω_2 - число витків на пару полюсів у роторі

$$\omega_2 = 244;$$

p - число пар полюсів

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = 2;$$

R_M - опір магнітопроводу на пару полюсів

$$R_M = \frac{F_0}{\Phi} \text{ Вс}$$

де Φ - магнітний потік основної частоти

$$\Phi = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ вб};$$

F_0 - сумарна м.д.с. холостого ходу на пару полюсів

$$F_0 = 2196a;$$

k_{ω_1} - обмоточний коефіцієнт статора

$$k_{\omega_1} = 0,934;$$

$k\omega_2$ - обмоточний коефіцієнт ротора

$$k\omega_2 = 1;$$

ω_1 - кутова швидкість повороту ротора при промисловій частоті

$$\omega_1 = 314 \frac{1}{сек};$$

$r_1; \omega_1 L_{11}$ - активний і індуктивний опір роторної обмотки

$$r_1 = 0,54 \text{ Ом};$$

$r_2; \omega_1 L_{22}$ - активний і індуктивний опір статорної обмотки

$$r_1 = 0,91 \text{ Ом};$$

$I_{ин}$ - момент інерції ротора

$$I_{ин} = 2,7 \text{ кгм}^2;$$

$I_{ст.н}$ - струм навантаження статора

$$I_{ст.н} = 22,8 \text{ А};$$

i_{BN} - струм збудження (номінальний) ротора

$$i_0 = i_{BN} = 18 \text{ А}$$

$i_{в.х.х.}$ - струм збудження холостого ходу ротора

$$i_{в.х.х.} = 9 \text{ А}.$$

Порядок вичислення коливальної функції $\psi^{11}(t)$ наступний.

Підставивши відповідні чисельні значення і виконавши розрахунки, отримуємо числові значення коливальної функції $\psi^{11}(t)$:

$$\psi^{11}(t) = -3,1 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(2\omega_1 t - \gamma_1);$$

У випадку несинусоїдального розподілу магнітної індукції у повітряній щілині значення коливальної функції визначається з урахуванням параметра

$$M_3 = \frac{1}{4} M_1 :$$

$$\psi^{11}(t) = -8 \cdot 10^{-4} \cdot \sin(2\omega_1 t - \gamma_2);$$

Аналогічно знаходяться коливання ротора для явнополусної синхронної машини, тобто, коли коефіцієнт самоіндукції статора є не постійною величиною в залежності від часу. В цьому випадку послідовність електромагнітних процесів зберігається, але всі математичні викладки і відповідні результати будуть більш громіздкими. Електромагнітний момент і швидкість ротора відповідно зростають. При цьому електромагнітний момент не залишається сталим, а постійно змінюється відповідно до протікання електромагнітних процесів в синхронному електроприводі, що призводить до механічних коливань ротора в межах 0,5 – 2,0 Гц.

Комп'ютерне моделювання дозволить отримати динаміку протікання електромагнітних і електромеханічних процесів в синхронному електроприводі та оцінити ступінь узгодженості з інженерними розрахунками та умовами експлуатації.

3.9 Комп'ютерна модель обертового моменту бігучого магнітного поля

В попередньому розділі приведена математична модель синхронного електропривода та методологічні підходи інженерного розрахунку, а також фізичного і комп'ютерного моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів [8 - 12]. На підставі цих результатів розроблено комп'ютерну модель синхронного електропривода і виконано дослідження статичної стійкості та отримано відповідні залежності між параметрами електромагнітних та електромеханічних процесів. Слід відзначити, що одним із першочергових технічних вимог і надійності електроприводів являється забезпечення нормованих коливань валу двигуна. На енергоємних промислових підприємствах такі вимоги порушуються внаслідок складних електротехнологічних процесів. Тому ці питання залишаються актуальними і підтверджуються вимогами практики. Їх вирішення доцільно досліджувати в поєднанні із зовнішніми параметрами електричних і механічних навантажень та внутрішніми електромагнітними явищами у просторі електропривода в цілому.

Обертовий момент бігучого магнітного поля залежить від струму, що протікає в статорних обмотках, і поточного положення ротора синхронної машини. Таким чином структура побудови комп'ютерної моделі полягає у відображенні фізичної суті процесів, що досліджуються, збуджуючих електричних параметрів та конструкції двигуна і його номінальних електричних параметрів.. Електромагнітні і електромеханічні процеси та збуджуючі параметри доцільно досліджувати в сукупності. При цьому, необхідно приймати до уваги, що заспокійливий механічний момент здійснюється за рахунок сил тертя в механічній частині електропривода. Тому при статичному навантаженні їх вплив на механічну систему і примусові механічні коливання валу не є суттєвим.

При дослідженні впливу різного характеру навантаження механічної системи на електромагнітні процеси доцільно розглядати модернізовану комп'ютерну модель з використанням відповідних прикладних програм MATLAB.

Розглянемо принципи основи моделювання електромеханічних процесів в синхронному електроприводі при статичній стійкості.

Для цього доцільно математичні моделі, що отримані і приведені в другому розділі перетворити до виду, який зручно використати в комп'ютерній моделі.

Механічний коливальний параметр $v(t)$ суттєво залежить від динаміки електромагнітних процесів та від просторових розмірів електричного двигуна відповідно до наступного рівняння:

$$\theta^{gm} = \omega_{gm} \cdot t + \frac{v^{11}(t)}{p} M \frac{d^2 \theta^{gm}}{dt^2} = \frac{1}{p} + \frac{d^2 v^{11}(t)}{dt^2} \quad (3.19)$$

Підставляючи значення $\frac{d^2 \theta^{gm}}{dt^2}$, струми $i_{i,l}$ першого наближення та після відповідних перетворень при додержанні фізичної суті процесів, що досліджуємо, та прирівнюючи постійну частину електромагнітного моменту і моменту механічних зусиль на валу ротора M_{mh} (який його врівноважує), отримуємо

$$M_{mh} = \frac{p}{2} \left\{ M_1 \left[i_0 I_1' - \frac{i_2''}{2} (I_1' - I_3') + \frac{i_2'}{2} (I_1' - I_3'') \right] + 3M_3 \left[i_0 I_3' + \frac{i_2'' I_1' + i_2' I_1''}{2} \right] \right\}. \quad (3.20)$$

В першому наближенні складові струмів статора ротора, зручно представити через i_1' , i_1'' (оскільки в даному випадку система лінійно-пропорційна). Це дозволяє автоматично враховувати параметр α_1 .

Змінна частина електромагнітного моменту відображає фізичний процес коливальної функції $v(t)$ у другому наближенні до третьої гармоніки включно, тобто, $v^{11}(t)$.

Комп'ютерна модель синхронного електропривода для дослідження статичної стійкості приведена на рис. 3.9, а на рис. 3.10 – структурна схема її механічної частини. При дослідженні впливу різного характеру навантаження механічної системи на електромагнітні процеси доцільно розглядати модернізовану комп'ютерну модель з використанням відповідних прикладних програм MATLAB.

З метою отримання достовірних результатів в моделі використано наступні електричні параметри і режими:

- рушійний режим відповідає потужності 60 кВА, напрузі 400 В, частоті живлячої мережі 50Гц синхронного двигуна;
- двигун запускається без навантаження шляхом використання автоматичного вимикача "Threephasebreaker" в $t=0.1$ с;
- напруга на обмотці збудження електромагнітного поля відсутня;
- при досягненні кутової швидкості ротора 99% від синхронної (0.99 pu), відключається резистор "R_start" тим самим забезпечуючи подачу напруги на обмотку збудження (1 pu);
- в цей час механічна потужність лінійно збільшується від нуля до 50% від номінальної ($P_m = -0.5$ pu) на протязі однієї секунди;
- двигун досягає синхронної швидкості (1 pu) на протязі часу, який дорівнює $t = 1.3$ с;
- після входу двигуна у синхронізм, в момент часу $t=1.5$ с, здійснюється штучний обрив однієї з фаз з послідовним його відновленням через $t=2.5$ с.

Такий режим роботи синхронного електропривода відповідає несиметрії можливого електротехнологічного режиму.

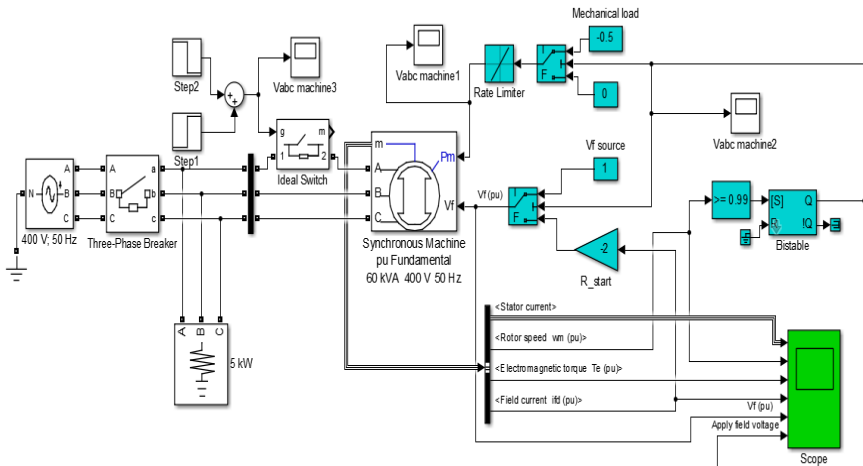


Рисунок 3.9 – Функціональна схема комп'ютерної моделі синхронного електропривода для дослідження статичної стійкості

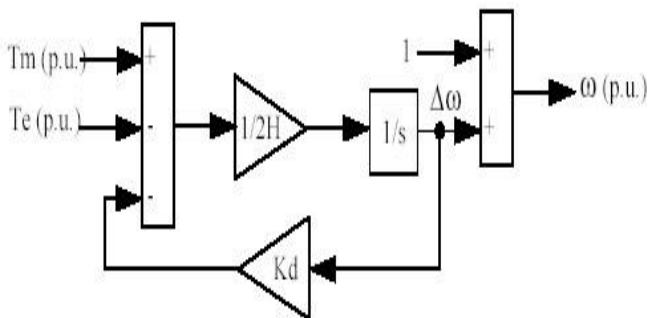


Рисунок 3.10 – Структурна схема механічної частини комп'ютерної моделі синхронного електропривода для дослідження статичної стійкості

На структурній схемі добре видно, що в моделі вираховується відхилення швидкості ротора від синхронної, а не саме значення швидкості.

3.10 Матеріали та результати дослідження

Моделювання проводилось у два етапи:

- пуск СД;
- імітація нестационарного електромеханічного навантаження.

Результати моделювання електромагнітних та електромеханічних процесів синхронного електропривода показані на рис. 3.11 – рис.3.14.

Матеріали та результати дослідження дозволяють оцінити ступінь узгодженості обертового моменту бігучого магнітного поля, струму, що протікає в статорних обмотках, положення ротора та ін. Вони відображають фізичні процеси, що відбуваються в порожнині синхронного електричного двигуна.

Всі величини приведені у відносних одиницях, що дозволяє оцінити відповідні зміни електромагнітного моменту (рис.3.11), струму збудження електромагнітного поля (рис.3.12), напруга, що прикладена до системи збудження електромагнітного поля (рис.3.13), Кутова швидкість ротора (рис.3.14), в залежності від часу навантаження.

Частота струму і напруги додержувалась 50 Гц.

Із рис. 3.14 видно, що на протязі однієї секунди напруга змінюється, а надалі залишається сталою. Це пояснюється тим, що в момент прикладення напруги в електричному двигуні відбуваються електромагнітні процеси в наслідок урівноваження перехідних процесів. В подальшому напруга не змінюється. В цей же час струм змінюється по протилежному напрузі закону, відповідає класичним законам електродинаміки і електротехніки.

В цей же проміжок часу на першій секунді електромагнітний момент двигуна сягає $(+2,7)$ та $(-5,7)$ і змінюється не симетрично. В подальшому електромагнітний момент зменшується по експоненціальному закону і приймає негативне значення. Це свідчить про те, що енергія що поступає із мережі витрачається на розгін обертової частоти ротора, про що свідчить ре гістограма на рис.3.16. В подальшому обертова швидкість дорівнює номінальним значенням через 1.35с.

При досягненні номінального значення обертової частоти через 1.49 с на валу електричного двигуна примусово прикладено механічне навантаження, що призвело до формування перехідних процесів, які пов'язані з перерозподілом кінетичної і потенціальної енергії ротора та його постійної часу (рис.3.13). Цей перехідний процес продовжується до 2,3 с, а в подальшому стабілізується. Це пояснюється тим, що заспокійливий механічний момент здійснюється за рахунок сил тертя в механічній частині електропривода. Тому при статичному навантаженні їх вплив на механічну систему і примусові механічні коливання валу не є суттєвим.

Слід відзначити, що коливання ротору синхронної машини мають механічний характер і вони залежать від співвідношення пружних і інерційних сил. В сталих режимах співвідношення між ними не змінюються. При навантаженнях співвідношення між ними постійно змінюються.

Це призводить до виводу системи із положення рівноваги в залежності від характеру електричного навантаження. Таким чином отримуємо, що коливання валу ротора синхронної машини залежать не тільки від електромагнітних процесів, а і від співвідношення пружних і інерційних сил.

Поряд з цим впливає ступінь механічної обробки валу і якість підшипників, які, в свою чергу, виготовляються з певними допусками. В

процесі експлуатації такі допуски зростають, що призводить до зменшення показників надійності електромеханічної системи в цілому.

В сталих режимах співвідношення між ними не змінюються.

При навантаженнях співвідношення між ними постійно змінюються. Це призводить до виводу системи із положення рівноваги в залежності від характеру електричного навантаження та механічного стану.

Перевірка робочої спроможності комп'ютерної моделі здійснювалась по отриманим результатам моделювання і запропонованому методу інженерного розрахунку механічних коливань валу при різних навантаженнях.

Результати комп'ютерного моделювання електромагнітних і електромеханічних процесів у синхронному електроприводі при навантаженнях приведені на рисунках 3.11 – 3.14.

На рис. 3.11– 3.14 приведено результати моделювання.

Матеріали та результати дослідження показали, що ступінь узгодженості обертового моменту бігучого магнітного поля, струму, що протікає в статорних обмотках співпадають і змінюються відповідно до змін навантаження.

Таким чином, електромагнітні та електромеханічні процеси, що відбуваються в синхронному електроприводі, змінюються відповідно до математичного представлення.

Доцільно відзначити, що всі фізичні величини приведені у відносних одиницях, тому не слід сприймати отримані результати в якості інженерної інформації. Метою дослідження було відпрацювання математичної моделі на комп'ютерній.

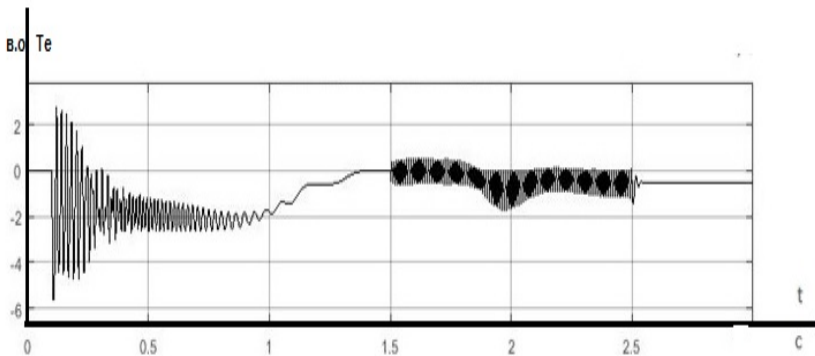


Рисунок 3.11 – Електромагнітний момент електропривода в залежності від часу

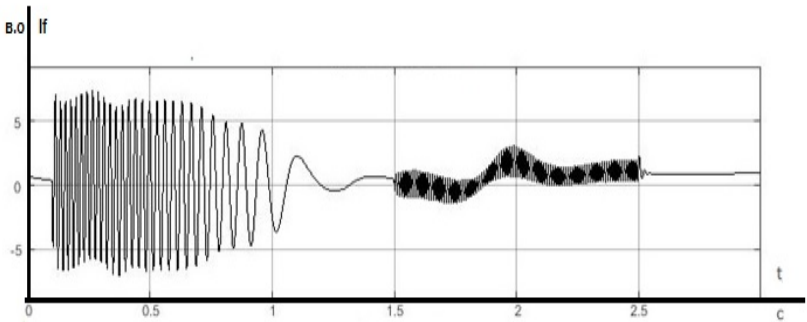


Рисунок 3.12 – Струм збудження електромагнітного поля в залежності від часу навантаження

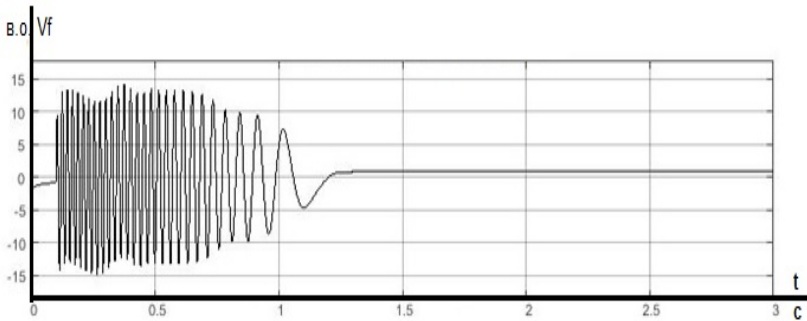


Рисунок 3.13 – Напруга , що прикладена до системи збудження електромагнітного поля в залежності від часу.

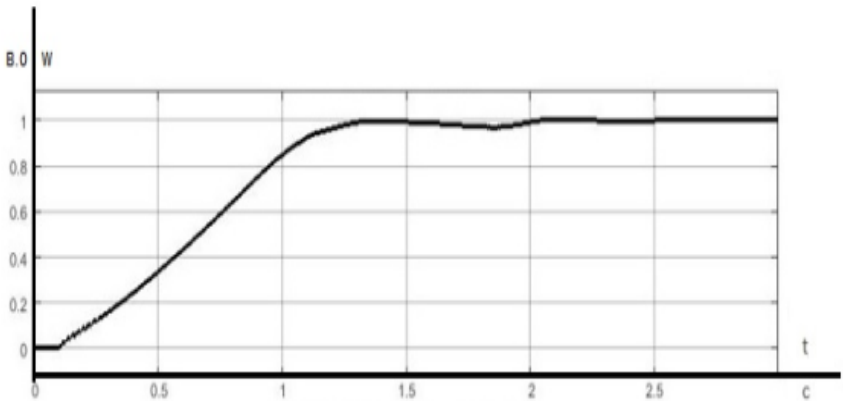


Рисунок 3.14 - Кутова швидкість ротора.

На рисунках видно, що електромагнітні і електромеханічні процеси синхронного електропривода відображаються відповідно до динаміки збуджувачих струмів і ступеню навантаження. В межах 0-1 с напруга і струм, прикладено до системи збудження електромагнітного поля змінюються узгоджено, відповідно до математичної моделі. При цьому електромагнітний момент електропривода, кутова швидкість ротора, струм, що протікає в статорній обмотці в залежності від часу навантаження змінюються досить узгоджено. Це свідчить про доцільність використання отриманих результатів при інженерних розрахунках, модернізації діючих та розробці нових типів електроприводів.

Таким чином, в синхронних та інших електромеханічних системах та об'єктах найбільш очікуваними пошкодженнями є механічні внаслідок зростання механічних коливань валу електричного двигуна. В синхронних електроприводах такі процеси прогресують в режимах встановлення синхронізму.

Останні пов'язані з коливанням ротору синхронної машини і мають електромагнітний в поєднанні з механічним процесами. Їх фізична природа полягає в постійному перерозподілі пружних і інерційних сил.

В сталих режимах співвідношення між цими силами не змінюються, а при порушенні умов експлуатації співвідношення між ними постійно змінюються, що призводить до порушення режиму рівноваги. Пружні сили прагнуть вернути коливальну систему в положення рівноваги, а інерційні прагнуть до змінення кутової швидкості.

При досягненні положення рівноваги пружні сили дорівнюють нулю. Інерційні сили прагнуть змінити кутову швидкість системи оскільки вони пропорційні прискоренню механічної системи.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зіновкін В.В. Різкозмінні навантаження та їх вплив на електротехнічне обладнання і методи дослідження: / В.В.Зіновкін // Навчальний посібник. - Запоріжжя ЗНТУ 2017. - 374 с.
2. Zinovkin V. Research of electromagnetic parameters of complex electromechanical system under hardly varying loads Variable Load / V. Zinovkin, M. Antonov and I. Krysan // *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 267-272, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160022.
3. Zinovkin v.v. research of the non-sinusoidal loads impact on the operability of tap-changers contacts / V.V.Zinovkin, O.V. Blyzniakov // Електротехніка та електроенергетика. науковий журнал. – Запоріжжя: НУ «ЗП», 2020. – № 2. – С
4. Зиновкин В.В. Исследование влияния искажений статорного напряжения асинхронного электропривода с выходными силовыми фильтрами / В.В. Зиновкин, В.И. Бондаренко, А.В. Соломаха // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. – Мелітополь: ТДАТУ, 2015. – Вип. 15., Т.2. – 382 с. – С.37-45.
5. Зиновкин, В.В. Исследование условий сходимости оптимизационного функционала многопараметрического технологического процесса приготовления магнетитовых огнеупорных изделий / В.В. Зиновкин , В.О. Мирный // *Радиоэлектроника, информатика, управление. ЗНТУ*: - Запоріжжя, 2015 - №3(34) - С.88-95.
6. Zinovkin V. Research of non-stationary electromagnetic processes in synchronous electric drive / V. Zinovkin, M. Antonov and I. Krysan // "*2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*", Kremenchuk, 2017, pp. 148-151, doi: 10.1109/MEES.2017.8248874.
7. V. Zinovkin, O. Blyzniakov and J. Vasilieva, "Physical simulation of electromagnetic phenomena in transformer equipment under strongly varying loads," *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, 2017, pp. 312-315. doi: 10.1109/MEES.2017.8248919

8. Zinovkin V., Blyzniakov O., Vasilieva Je. Non-stationary Electromagnetic Processes in power-Intensive Electrical Facilities with Highly Varying Loads //2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), September 23-25, 2019 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, pp. 362-365. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896620
9. Zinovkin V., Antonov M., Krysan I. Simulation of Static Stability of Synchronous Electric Drive at Hardly Variable Load //2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), September 23-25, 2019 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, pp. 86 - 89. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896368
10. Research of electromagnetic parameters of complex electromechanical system under hardly varying loadsVariable Load / V. Zinovkin, M. Antonov and I. Krysan, *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 267-272, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160022.
11. Zinovkin V.V. research of the non-sinusoidal loads impact on the operability of tap-changers contacts / V.V.Zinovkin, O.V. Blyzniakov // *Електротехніка та електроенергетика. науковий журнал. – Запоріжжя: НУ «ЗП», 2020. – № 2. – С*