**5 ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ ТА ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБ’ЄКТУ**

**5.1 Визначення параметрів контуру регулювання струму (моменту)**

Рівняння динаміки електричної частини СД мають вигляд (2.31)

 (5.1)

З першого рівняння в (5.1) маємо

, (5.2)

так, що похибка відпрацювання моменту буде

, (5.3)

де .

Визначивши похибку відпрацювання струму статора по осі d як , запишемо рівняння (5.1) у формі похибок відпрацювання

 (5.4)

За умов  рівняння регуляторів струму будуть мати вигляд

 (5.5)

де  – інтегральні складові регуляторів струму

 – коефіцієнти пропорційної та інтегральної складових регуляторів струму.

Після підстановки (5.5) в (5.4) отримаємо наступні рівняння динаміки похибок відпрацювання в електричній підсистемі СД

 (5.6)

 (5.7)

де .

Система (5.6) описує динаміку контуру регулювання струму по осі q з вихідним рівнянням похибки регулювання моменту. Система (5.7) – рівняння динаміки похибок відпрацювання в контурі регулювання струму по осі d. Лінійні системи (5.6), (5.7) є асимптотично стійкими для усіх , тому за умови  досягається асимптотичне регулювання струмів , а отже і . Оптимізація динамічної поведінки забезпечується стандартним вибором коефіцієнтів  та , як для лінійної системи другого порядку.

З іншого боку, після виключення компенсуючих зв’язків структура контуру регулювання струму набуває вигляду, який показано на рис.5.1.



Рисунок 5.1 – Структура контуру регулювання струму

Передаточна функція контуру регулювання струму, що відповідає структурі на рис.5.1 , має вигляд

 (5.8)

Стандартна форма (5.8) буде

 (5.9)

або

 (5.10)

де  – власна частота недемпфованих коливань,

 – коефіцієнт демпфування.

Стандартне налаштування з  дає співвідношення , а для  маємо .

Система з передаточною функцією (5.9) або (5.10) має перехідну функцію з перерегулюванням приблизно 25%. Для виключення перерегулювання на вході системи рис.(5.2), необхідно встановити фільтр першого порядку зі сталою часу . При цьому підсистема моменту набуває вигляду



Рисунок 5.2 – Підсистема регулювання моменту

З рис.5.2 еквівалентна структура підсистеми регулювання моменту має вигляд:



Рисунок 5.3 – Еквівалентна структура підсистеми регулювання моменту

Передаточна функція відносно моменту з рис.5.3 буде

 (5.11)

Передатна функція (5.11) при  відповідає налаштуванню на модульний оптимум. Перерегулювання в перехідній функції при цьому складає , а час першого спряження складає . При налаштуванні з  перерегулювання відсутнє, а час регулювання приблизно визначається .

Графіки перехідних процесів, отриманих в результаті тестування приводу і моделювання представлено на рис.5.4 та рис.5.5 відповідно.

В ході тестування від приводу вимагалося відпрацювати заданий момент , при цьому вал двигуна стопорився. Величини представлені у збільшеному масштабі. Крок вимірювання при експерименті – 0,25 мс.

Параметри контуру регулювання струму при експерименті наступні: коефіцієнт пропорційної складової ПІ-регулятора струму , час інтегрування .

Параметри контуру регулювання струму при моделюванні: коефіцієнт пропорційної складової ПІ-регулятора струму , коефіцієнт інтегральної складової .





Рисунок 5.4 – Експериментальні перехідні процеси відпрацювання заданого моменту 

Як видно з отриманих графіків, при такому налаштуванні струм  відпрацьовується без перерегулювання, час перехідного процесу приблизно 0,0006 с, що може відповідати  і , так, що  з часом регулюванння .

На рис.5.5 представлено результати математичного моделювання, які з достатньою точністю співпадають з отриманими експериментальними результатами.





Рисунок 5.5 – Графіки перехідних процесів відпрацювання моменту  при моделюванні

**5.2 Визначення параметрів механічної частини електроприводу**

Виходячи початково з одномасового представлення, схематизація механічної частини може бути представленою у наступному вигляді



Рисунок 5.6 – Схематизація механічної частини електроприводу

На рис.5.6 позначено:

 – сумарний момент двигуна та навантажувальної машини;

 – коефіцієнт в’язкого тертя, що визначає момент в’язкого тертя

 (5.12)

 – коефіцієнт сухого тертя, що визначає момент сухого тертя у вигляді

 (5.13)

Рівняння руху для системи, що показана на рис.5.6 запишеться у вигляді

 (5.14)

 (5.15)

Оскільки похибка регулювання  швидко затухає в нуль у відповідності до динамічної поведінки контуру регулювання струму, то з рис.5.6 та (5.14)-(5.15) отримаємо структуру одномасового електромеханічного об’єкту, яка зображена на рис.5.7.



Рисунок 5.7 – Структура одномасового електромеханічного об’єкту

На рис.5.7 враховано, що при коефіцієнті демпфування  налаштування контуру регулювання струму (КРС) передаточна функція

 (5.16)

Для визначення параметрів моделі механічної частини (5.14) можливо застосувати канали керування моментами  та . Наприклад, при постійному , нульовому  та нехтовно малими  та  з рівняння



встановлюємо, що

 (5.17)

Графічне трактування змінних в (5.17) показано на рис.5.8.



Рисунок 5.8 – Графічне зображення тесту для розрахунку моменту інерції

Експериментальні результати тесту для визначення показані на рис.5.9. Експеримент полягає у визначенні швидкості через напругу, яка прикладається до двигуна при відпрацюванні заданого моменту.

Рисунок 5.9 – Осцилограма тесту для визначення моменту інерції

,

де  - швидкість на початку і в кінці розгону та час, що відповідає швидкості – числові значення, отримані з осцилограми на рис.5.9.

Значення моменту інерції з (5.17) розраховується у вигляді:



Таким чином встановлюємо, що значення сумарного моменту інерції складає приблизно , де  – момент інерції синхронного двигуна. Коефіцієнт моменту  визначається з паспортних даних СД, наведених в табл.4.3. Відносно діючих значень струмів він дорівнює

,

а відносно амплітудних значень – .

Для подальшого аналізу розглянемо структуру електроприводу з підпорядкованим керуванням, що має внутрішній контур регулювання струму, який був розглянутий раніше, та зовнішній контур регулювання швидкості з пропорційним регулятором. Структурна схема такого контуру наведена на рис.5.10.



Рисунок 5.10 – Структурна схема електроприводу з підпорядкованим керуванням

На рис.5.10 позначено  – передаточна функція фільтра в контурі регулювання швидкості, – коефіцієнт пропорційного регулятора швидкості. При , де – стала часу фільтра, завжди існує значення , при якому контур регулювання швидкості буде стійким. При тестуванні було обрано , що при визначеному налаштуванні контуру регулювання струму в (5.16) з для попереднього аналізу можливо розглядати систему на рис.5.10 з . За таких умов структурна схема системи зниженого порядку має вигляд, показаний на рис.5.11.



Рисунок 5.11 – Структурна схема системи зниженого порядку

Передаточні функції системи, що зображена на рис.5.11 мають вигляд

 (5.18)

 (5.19)

Дійсно, при значеннях сталої часу  в (5.18) та (5.19) впливом динаміки фільтра швидкості з , та динаміки контуру регулювання струму з  можна знехтувати. За цих умов реакція контуру регулювання швидкості у відповідності до (5.18) та (5.19) має бути аперіодичною, як для системи першого порядку. Прийнявши  при ,  будемо мати , яке підходить для умов початкового дослідження.

На рис.5.12 показано графіки перехідних процесів в контурі регулювання швидкості з пропорційним регулятором швидкості при . Умови тесту наступні:

1. Від ненавантаженого СД вимагається відпрацювати лінійно наростаючу траєкторію, яка починається з нуля та досягає значення 200 рад/с за інтервал часу .

2. В момент часу  до валу СД стрибкоподібно прикладається постійний номінальний момент навантаження, що становить Мс=0.4 Нм.

При тестуванні в контурі регулювання швидкості було встановлено фільтр першого порядку з . Відзначимо також, що на графіках перехідних процесів в умовах експерименту електричні змінні представлені в термінах діючих значень.

З експериментальних графіків перехідних процесів встановлюємо:

1. Перехідні процеси мають перерегулювання в моменті та, відповідно, в моментному струмі .

2. Момент навантаження в процесі розгону мало залежить від швидкості. В статиці під постійним навантаженням Мс=0.4 Нм (при ) момент двигуна приблизно на 0.1 Нм більше, ніж Мс. На холостому ходу при  момент двигуна також дорівнює приблизно (0.08-1) Нм.

Аналіз перехідних процесів свідчить, що механічна частина електроприводу не може розглядатись як одномасова, оскільки в динаміці моменту присутнє перерегулювання. Момент тертя має домінуючу складову тертя покою, або тертя «сухого» та в значно меншій мірі в’язкого тертя.

Для підтвердження цього факту було виконано тест, аналогічний показаному на рис.5.12, але при розгоні на 100 рад/с. Порівняння поведінки моменту на рис.5.13 при розгоні до швидкості 100 рад/с та графіків на рис.5.12 показує, що складова моменту сухого тертя складає приблизно  для обох перехідних процесів, що відповідає значенню . Решта моменту відповідає коефіцієнту в’язкого тертя .







Рисунок 5.12 – Графіки перехідних процесів при тестуванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.13 – Графіки перехідних процесів при тестуванні системи керування швидкістю Rexroth (, )

На рис.5.14-рис.5.15 показано графіки перехідних процесів в системі керування швидкості, які отримано шляхом математичного моделювання при наступних значеннях параметрів налаштування:



Графіки при розгоні до 200 рад/с та 100 рад/с представлені на рис.5.14-рис.5.15 відповідно. Результати математичного моделювання свідчать, що при одномасовому представленні відповідно до (5.14) коливальність має бути відсутньою. З цього факту слідує, що механічна частина електроприводу, що розглядається, не може бути представлена у вигляді одномасового об’єкту керування. Поясненням цього факту є присутність пружного з’єднання СД та навантажувальної машини з рахунок використання гумової муфти.

Для підтвердження цього факту на рис.5.16 представлені графіки експериментальних логарифмічних амплітудних та фазочастотних характеристик системи електроприводу та частотних характеристик, розрахованих для одномасового об’єкту (рис.5.7). Значення для побудови ЛАЧХ та ЛФЧХ зведено в табл.5.1.

Експериментальні частотні характеристики на рис.5.16 демонструють ознаки двомасовості механічної частини, що проявляється в наявності резонансної поведінки в зоні частот 10-30 Гц. В той же час розрахункова частотна характеристика має монотонно спадаючий характер в діапазоні цих частот.







Рисунок 5.14 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.15 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (,)

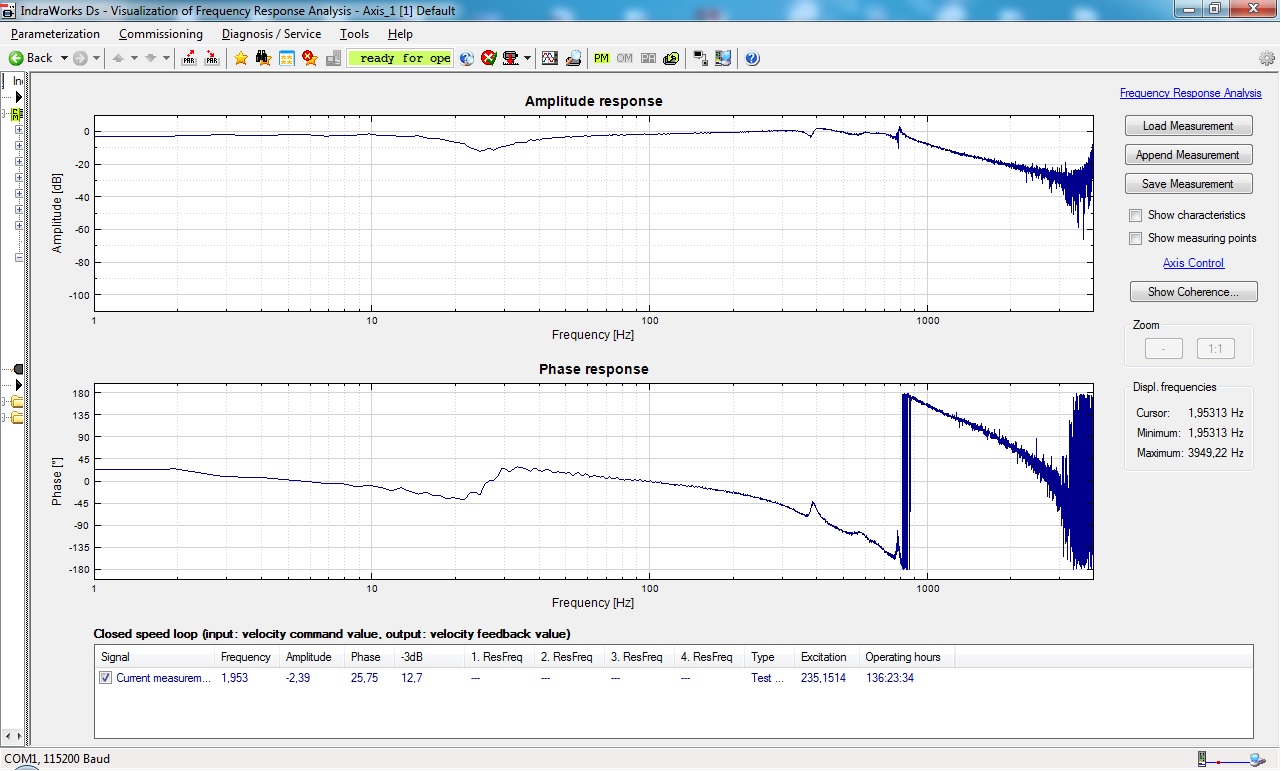


Рисунок 5.16 – ЛАЧХ та ЛФЧХ контуру регулювання швидкості (експеримент)

Рисунок 5.17 – ЛАЧХ та ЛФЧХ, отримані при моделюванні одномасового об’єкту

Таблиця 5.1 – Розрахунки ЛАЧХ та ЛФЧХ одномасової системи

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Частота f, Гц | Амплітуда вихідного сигналу, рад/с | Зсув вихідного сигналу, t, с | Зсув вихідного сигналу, о |
| 1 | 1 | 98 | 0.00282 | -1.0152 |
| 2 | 2 | 97.82 | 0.00418 | -3.0096 |
| 3 | 3 | 97.55 | 0.00462 | -4.9896 |
| 4 | 4 | 97.16 | 0.0049 | -7.0560 |
| 5 | 5 | 96.65 | 0.00501 | -9.0180 |
| 6 | 6 | 96.04 | 0.00508 | -10.9728 |
| 7 | 7 | 95.33 | 0.00515 | -12.9780 |
| 8 | 8 | 94.53 | 0.00523 | -15.0624 |
| 9 | 9 | 93.65 | 0.00516 | -16.7184 |
| 10 | 10 | 92.68 | 0.00517 | -18.6120 |
| 11 | 12 | 90.55 | 0.00514 | -22.2048 |
| 12 | 14 | 88.18 | 0.00509 | -25.6536 |
| 13 | 15 | 86.9 | 0.00513 | -27.7020 |
| 14 | 16 | 85.61 | 0.00504 | -29.0304 |
| 15 | 18 | 82.92 | 0.00499 | -32.3352 |
| 16 | 20 | 80.1 | 0.00498 | -35.8560 |
| 17 | 22 | 77.28 | 0.0048 | -38.0160 |
| 18 | 25 | 72.9 | 0.00476 | -42.8400 |
| 19 | 27 | 70 | 0.0046 | -44.7120 |
| 20 | 30 | 65.7 | 0.0045 | -48.6000 |
| 21 | 35 | 59 | 0.00431 | -54.3060 |
| 22 | 40 | 52.66 | 0.00405 | -58.3200 |
| 23 | 45 | 46.77 | 0.00378 | -61.2360 |
| 24 | 50 | 41.32 | 0.00368 | -66.2400 |
| 25 | 60 | 31.69 | 0.00336 | -72.5760 |
| 26 | 70 | 23.47 | 0.00306 | -77.1120 |
| 27 | 80 | 16.36 | 0.00276 | -79.4880 |
| 28 | 90 | 10.18 | 0.00248 | -80.3520 |
| 29 | 100 | 4.9 | 0.0019 | -68.4000 |

**5.3 Двомасове представлення електромеханічної частини**

Виходячи з результатів дослідження динамічних властивостей контуру регулювання швидкості та його частотних характеристик, будемо розглядати механічну частину електроприводу як двомасовий електромеханічний об’єкт, схематизація якого представлена на рис.5.18. Згідно цієї схематизації електромеханічний момент М синхронного двигуна прикладається до ротора двигуна з моментом інерції , який через пружний елемент, пружністю с, зв’язаний з якорем ДПС (навантажувальної машини), що має момент інерції  та створює момент навантаження Мс.



Рисунок 5.18 – Схематизація двомасового електромеханічного об’єкта

Кутові положення та швидкості, що відносяться до СД та навантажувальної машини визначені як () та () відповідно. Моменти в’язкого тертя, що діють на першу, другу маси та у пружному елементі , характеризуються коефіцієнтами в’язкого тертя  відповідно. Оскільки фізично момент сухого тертя пов’язаний з тертям у колекторному вузлі ДПС, то в схематизації на рис.5.18 він діє лише на другу масу. Електромеханічному об’єкту у двомасовому представленні відповідають рівняння динаміки у вигляді

 (5.20)



Як видно з (5.20), для електромеханічного об’єкта необхідно встановити наступні параметри:

моменти інерції ;

пружність с;

коефіцієнти в’язкого та сухого тертя.

Процедурно визначення цих параметрів здійснювалося у декілька кроків. З паспортних даних СД відомо значення моменту інерції . З попереднього тесту розгону відомо, що  у одномасовому представленні дорівнював . Із значення моменту в режимах холостого ходу та під навантаженням встановлено діапазон змін  та .

Для подальшого визначення параметрів двомасового електромеханічного об’єкту було виконано дослідження в системі регулювання з пропорційним регулятором швидкості. Структурна схема досліджуваної системи наведена на рис.5.19. Шляхом послідовних тестів моделюванням системи, що наведена на рис.5.19 були встановлені уточнені значення параметрів двомасового об’єкту:





Рисунок 5.19 – Структурна схема контуру регулювання швидкості з двомасовим об’єктом а),

структура підсистеми регулювання моменту (ПРМ) б)

Для верифікації визначених параметрів моделі механічної частини досліди, перехідні процеси яких наведено на рис.5.12 - рис.5.13, доповнено аналогічними тестами при  та . Відповідні графіки перехідних процесів наведено на рис.5.20-рис.5.23. Результати математичного моделювання системи регулювання швидкості в умовах аналогічних тестів при використанні визначених параметрів представлено на рис.5.24-рис.5.26 при розгоні до 200 рад/с та рис.5.27-рис.5.29 при розгоні до 100 рад/с.







Рисунок 5.20 – Графіки перехідних процесів при тестуванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.21 – Графіки перехідних процесів при тестуванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.22 – Графіки перехідних процесів при тестуванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.23 – Графіки перехідних процесів при тестуванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.24 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.25 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.26 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.27 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.28 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (, )







Рисунок 5.29 – Графіки перехідних процесів при моделюванні системи керування швидкістю Rexroth (, )

Додатково було побудовано ЛАЧХ та ЛФЧХ контуру регулювання швидкості на основі моделювання системи регулювання швидкості з двомасовим об’єктом. Значення даних для побудови частотних характеристик наведені в табл.5.2, з використанням яких побудовані ЛАЧХ та ЛФЧХ, що наведені на рис.5.30.

Таблиця 5.2 - Точки для побудови ЛАЧХ та ЛФЧХ

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Частота f, Гц | Амплітуда вихідного сигналу, рад/с | Зсув вихідного сигналу, t, с | Зсув вихідного сигналу, о |
| 1 | 1 | 98 | 0.00306 | 1.1016 |
| 2 | 2 | 97.84 | 0.00424 | 3.0528 |
| 3 | 3 | 97.52 | 0.00474 | 5.1192 |
| 4 | 4 | 97.11 | 0.0051 | 7.3440 |
| 5 | 5 | 96.57 | 0.00525 | 9.4500 |
| 6 | 6 | 95.69 | 0.00543 | 11.7288 |
| 7 | 7 | 94.47 | 0.00555 | 13.9860 |
| 8 | 8 | 93.01 | 0.0057 | 16.4160 |
| 9 | 9 | 91.3 | 0.00591 | 19.1484 |
| 10 | 10 | 89.29 | 0.00593 | 21.3480 |
| 11 | 12 | 84 | 0.00629 | 27.1728 |
| 12 | 14 | 76.74 | 0.00654 | 32.9616 |
| 13 | 15 | 72.22 | 0.00662 | 35.7480 |
| 14 | 16 | 67.07 | 0.00658 | 37.9008 |
| 15 | 18 | 55.44 | 0.0064 | 41.4720 |
| 16 | 20 | 43.3 | 0.00572 | 41.1840 |
| 17 | 22 | 33.3 | 0.00407 | 32.2344 |
| 18 | 25 | 28.66 | 0.0007 | 6.3000 |
| 19 | 27 | 32 | 0.0001 | 0.9720 |
| 20 | 30 | 40.06 | -0.00154 | -16.6320 |
| 21 | 35 | 51.73 | -0.00151 | -19.0260 |
| 22 | 40 | 59.4 | -0.0012 | -17.2800 |
| 23 | 45 | 64.5 | -0.0009 | -14.5800 |
| 24 | 50 | 67.96 | -0.0007 | -12.6000 |
| 25 | 60 | 72.2 | -0.0004 | -8.6400 |
| 26 | 70 | 74.628 | -0.00022 | -5.5440 |
| 27 | 80 | 76.15 | -0.0001 | -2.8800 |
| 28 | 90 | 77.2 | -0.0001 | -3.2400 |
| 29 | 100 | 77.95 | 0 | 0 |



Рисунок 5.30 – ЛАЧХ та ЛФЧХ контуру регулювання швидкості на основі моделювання системи регулювання швидкості з двомасовим об’єктом

Як видно з результатів експериментального тестування та математичного моделювання системи керування швидкістю з двомасовим об’єктовим (рис. 5.12, рис. 5.13, а також рис. 5.20-рис. 5.29) під час відпрацювання траєкторії швидкості присутня динамічна помилка, яка досягає значень 13 рад/с для П регулятора з коефіцієнтом , 25 рад/с для П регулятора з коефіцієнтом  та 45 рад/с для П регулятора з коефіцієнтом .

При накиданні моменту навантаження присутня статична похибка, що складає 10% для П регулятора з коефіцієнтом , 25% для П регулятора з коефіцієнтом  та 45% для П регулятора з коефіцієнтом .

Струми відпрацьовуються без помилок для всіх значень коефіцієнту в П регуляторі швидкості.

На проміжку часу після завершення розгону (0,05 с) до накидання моменту навантаження (0,25 с) момент двигуна становить приблизно 0,08 Нм, що зумовлено наявністю в’язкого тертя.

Зі зменшенням коефіцієнту П регулятора динамічна похибка зростає, а також перехідні процеси стають затягнутішими і складають 0,06с, 0,07с та 0,012с для коефіцієнтів П регулятора ,  та  відповідно.

Отримані експериментальні дані з достатньою точністю співпадають з моделюванням. Відмінності прослідковуються у наявності коливань напруги по осі q на проміжку часу від закінчення розгону до накидання моменту навантаження, зумовлених пружністю у з’єднанні двигунів.

В якості підтвердження того, що дана система приводу повинна розглядатися як двомасова, також було проведено порівняння логарифмічних амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик контуру швидкості, які можна отримати засобами Rexroth (експериментально) та промоделювавши дану систему (ЛАЧХ та ЛФЧХ по точках). При цьому до системи прикладався синусоїдний сигнал амплітудою  та з частотою згідно табл.5.2. Порівнюючи ЛАЧХ та ЛФЧХ контуру керування швидкості для одномасової системи (рис.5.17) з ЛАЧХ та ЛФЧХ для двомасової системи (рис.5.30) та з ЛАЧХ та ЛФЧХ, отриманої експериментально (рис.5.31), відзначаємо на ній відсутність резонансних частот [27] а також відмінність форми характеристик.

Високий ступінь співпадіння результатів, отриманих експериментально та при моделюванні свідчить про те, що модель, представлена на рис.5.19 цілком підходить для моделювання електромеханічних процесів і враховує всі основні параметри, що впливають на характер цих процесів. Варто відмітити також, що, як показали тести, деякі параметри моделі, особливо коефіцієнти тертя, не є стаціонарними можуть розглядатися такими, шо варіюються відносно вказаних раніше усереднених значень.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

В результаті повномасштабних тестів синхронного електроприводу та навантажувального агрегату на експериментальній установці та математичного моделювання встановлено структуру електромеханічного об’єкту та визначені його параметри. Доведено, що дана система приводу повинна розглядатися як двомасова.

В якості підтвердження того, що дана система приводу повинна розглядатися як двомасова, було проведено експериментальне дослідження системи керування швидкістю з П-регулятором і моделювання одномасової системи. Розбіжності у отриманих результатах моделювання та тестування підтверджують це припущення. Додатково було порівняно логарифмічні амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики контуру швидкості, які можна отримати засобами Rexroth (експериментально) та промоделювавши дану систему (ЛАЧХ та ЛФЧХ по точках).

Засобами математичного моделювання та експериментального тестування було встановлено основні параметри механічної частини електроприводу. Високий ступінь співпадіння результатів, отриманих експериментально та при моделюванні свідчить про те, що представлена модель цілком підходить для моделювання електромеханічних процесів і враховує всі основні параметри, що впливають на характер цих процесів.