

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
141 – «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»
(У ТОМУ ЧИСЛІ СКОРОЧЕНИЙ ТЕРМІН НАВЧАННЯ)

КРЕМЕНЧУК 2018

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Загальні питання надійності електрообладнання» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (у тому числі скорочений термін навчання)

Укладачі: к. т. н., доц. С. В. Сукач,
старш. викл. Д. В. Рєзнік,
асист. М. А. Руденко

Рецензент к. т. н., доц. Ю. В. Зачепа

Кафедра систем автоматизованого управління та електропривода

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № _____ від _____ 2018 р.

Голова методичної ради _____ проф. В. В. Костін

ЗМІСТ

Вступ	4
Лабораторна робота № 1 Дослідження надійності всипних обмоток асинхронного двигуна	5
Лабораторна робота № 2 Визначення терміну служби ізоляції електричних машин.....	8
Лабораторна робота № 3 Визначення параметрів двигуна постійного струму за методом планування експерименту першого порядку	11
Лабораторна робота № 4 Вивчення процесу відтворення сигналу швидкості обертання двигуна постійного струму за відомим сигналом струму якоря у пусковому режимі	19
Лабораторна робота № 5 Ідентифікація параметрів двигуна постійного струму методом енергодіагностики за системою ТП-Д типу «КЕМРОН»	24
Лабораторна робота № 6 Ідентифікація параметрів електроприводу постійного струму за перехідними характеристиками	33
Критерії оцінювання знань студентів.....	42
Список літератури.....	43
Додаток А Технічні дані ДПС серії 2П	44
Додаток Б Опис лабораторного стенда № 1.....	46
Додаток В Опис лабораторного стенда № 2.....	49
Додаток Г Розкладання полігармонічного сигналу в ряд Фур'є	52
Додаток Д Зразок оформлення титульної сторінки звіту.....	56

ВСТУП

Методичні вказівки містять основні методи діагностування електричних машин та електромеханічних систем, що входять до переліку тем робочої та навчальної програм з навчальної дисципліни «Загальні питання надійності електрообладнання» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (у тому числі скорочений термін навчання).

Метою методичних вказівок є надання студентам практичних знань щодо розв'язання задач діагностики електромеханічних систем; вибору відповідних методів для їх розв'язання; аналізу отриманих результатів.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

знати:

- сучасні моделі надійності обмоток електродвигунів;
- види та причини виходу з ладу обмоток електродвигуна;
- до чого призводить теплове старіння ізоляції та за що відповідають такі параметри, як теплостійкість і нагрівостійкість ізоляції;
- методи планування експерименту;
- метод Ейлера та модифікований метод Ейлера;
- ряди Фур'є, рівняння миттєвої потужності та метод енергодіагностики;
- динамічні параметри системи «тиристорний перетворювач–двигун» і основні методи їх визначення;

уміти:

- визначати ймовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції на підставі математичної моделі надійності;
- визначати термін служби ізоляції електричних машин;
- визначати параметри двигуна постійного струму за методом планування експерименту першого порядку;
- відтворювати сигнал швидкості обертання двигуна постійного струму за відомим сигналом струму якоря у пусковому режимі;
- виконувати ідентифікацію параметрів двигуна постійного струму методом енергодіагностики за системою «тиристорний перетворювач–двигун»;
- виконувати ідентифікацію параметрів електроприводу постійного струму за перехідними характеристиками.

Самостійна робота студентів містить додаткове вивчення лекційного матеріалу, підготовку до практичних занять з основних тем навчального курсу.

Лабораторна робота № 1

Тема. Дослідження надійності всипних обмоток асинхронного двигуна

Мета: визначення ймовірності безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції на підставі математичної моделі надійності.

Короткі теоретичні відомості

На сьогоднішні моделі надійності всипних обмоток є математичними, тобто вони являються ймовірнісними моделями, що розробляються на підставі обробки великого обсягу статистичної інформації.

Відмова обмотки зазвичай пояснюється міжвитковим замиканням, тому найбільш інформативною характеристикою є величина пробивної напруги. Відмова відбувається, коли напруга, прикладена до сусідніх витків, перевищує пробивну напругу міжвиткової ізоляції.

До необхідних параметрів, які треба знати для визначення ймовірності безвідмовної роботи, належить: реальний розподіл пробивних напруг міжвиткової ізоляції та прикладених напруг, характер зміни випадкової функції розподілу пробивних напруг міжвиткової ізоляції у функції часу.

Вихідними даними для розрахунків є:

- 1) кількість ефективних провідників у секції – S (65);
- 2) кількість послідовно з'єднаних секцій – q (2 обм, $q = 6$);
- 3) кількість пазів статора – $Z = 12$;
- 4) кількість сторін секцій у пазу (шарів обмотки) – C (2);
- 5) частота пусків електродвигуна на годину – f (від 2 до 120 в годину);
- 6) стала температура обмотки під час експлуатації – T ;
- 7) емпіричні залежності статистик пробивної напруги ізоляції обмоток

$\lg U_0$ і при заданих умовах експлуатації.

У моделі надійності всипних обмоток асинхронних машин, що розглядається, приведені такі електричні номінали:

$$\lg U_0 = 4,71 - 2,23X_{1i} - 0,491X_{2i} - 1,366X_{4i} - 0,06X_{1i}X_{2i} + 0,09X_{1i}X_{4i}; \quad (1.1)$$

$$X = \frac{X_k - X_H}{\Delta X}; \quad (1.2)$$

$$A = 5,534 - 2,159 X_{1i} - 0,259 X_{2i} - 1,041 X_{4i} + 0,097 X_{1i} X_{2i} + 0,092 X_{1i} X_{4i}, \quad (1.3)$$

де X_{1i} – температура обмотки електродвигуна – T (від 120 до 150 0С); X_{2i} – частота пусків в годину – f (2 до 120); X_{4i} – час роботи електродвигуна – $t_{\text{год}}$ (від 504 до 2164).

Хід роботи

1. Визначити кількість ефективних провідників в обмотці електродвигуна:

$$N = SCZ. \quad (1.4)$$

2. Визначити кількість елементів математичної моделі:

$$n = 2,7N. \quad (1.5)$$

3. Визначити ймовірність відмови обмотки $Q(t_i)$ за час $\Delta t_i - Q_{\Delta t_i}$:

$$Q = \frac{1}{0,98S - 1,6} \sum_{w=1}^{S-1} \ln \frac{S}{w} \sum_{K=1}^{10} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(K-1)^2}{0,08}} + \frac{0,35}{1 + (K-3)^2} \right] \times \left[1 - e^{-\frac{n}{U_0} \left(\frac{KwU_{\phi m}}{0,9Sq} \right)^{\alpha_i}} \right], \quad (1.6)$$

де $U_{\phi m}$ – амплітуда фазної напруги; k – кратність комутаційних перенапруг; w – різниця порядкових номерів провідників у пазу (1, 2, 3–S-1).

4. Визначити ймовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції послідовно для кожного інтервалу часу з одним включенням електродвигуна:

$$P(t_i) = 1 - Q(t_i). \quad (1.7)$$

5. Визначити ймовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції в функції часу можна шляхом послідовного множення значень надійності $P(t_i)$ в окремих інтервалах часу:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P(t_i) \cdot \quad (1.8)$$

Рекомендації щодо обробки результатів

Ця методика дозволяє визначити надійність міжвиткової ізоляції для будь-якого періоду експлуатації і напрацювання.

Дані про температуру обмотки в кожному циклі пуску і відключення заносять до таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Температура обмотки в кожному циклі пуску і відключення

№ пуску і відключення		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T_{Π}	T_{OCT}												
T													

T_{Π} – температура обмотки в момент пуску двигуна; T_{OCT} – температура обмотки в момент зупинки двигуна.

Для кожного інтервалу роботи двигуна проводиться розрахунок середньої температури:

$$T = \frac{T_{\Pi} + T_{OCT}}{2} \cdot \quad (1.9)$$

Згідно з формулам (1.1)–(1.5) проводиться розрахунок ймовірності відмови обмотки в заданому інтервалі роботи за даними двигуна й отриманим значенням температури обмотки.

За формулою (1.6) визначається ймовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції для кожного інтервалу часу.

За формулою (1.7) визначається ймовірність безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції в функції часу.

Завдання для самоконтролю. Визначити розподіл ймовірності безвідмовної роботи міжвиткової ізоляції протягом 5 років, вважаючи, що двигун працює в заданому режимі 16 годин на добу.

Зміст звіту

1. Титульна сторінка із зазначенням теми лабораторної роботи.
2. Мета, короткі теоретичні відомості.
3. Опис виконання лабораторної роботи.
4. Висновки щодо виконаної роботи.

Контрольні питання

1. Що називається безвідмовністю технічного пристрою?
2. Що називається надійністю технічного пристрою?
3. Назвіть способи підвищення надійності всипних обмоток асинхронних машин.

Лабораторна робота № 2

Тема. Визначення терміну служби ізоляції електричних машин

Мета: дослідження нагрівання ізоляції трансформатора з різними потужностями навантаження і визначення терміну служби ізоляції.

Короткі теоретичні відомості

Одним з основних чинників, що впливають на термін служби ізоляції електричних машин і трансформаторів, є теплове старіння. У зв'язку з цим розрізняють такі поняття, як теплостійкість і нагрівостійкість ізоляції.

Теплостійкість відповідає за здатність електроізоляційного матеріалу під час короткочасного нагрівання зберігати свої властивості на сталому рівні. За таких умов матеріал не повинен руйнуватися і розшаровуватися, змінювати

хімічний склад, не повинно виникати значних пластичних деформацій матеріалу.

Нагрівостійкість характеризує здатність матеріалу без істотного погіршення характеристик витримувати вплив гранично допустимої для певного класу ізоляції температури протягом періоду часу, що відповідає терміну служби машини. Для практичних цілей нагрівостійкість є важливішою характеристикою ізоляції, тому саме вона покладена в основу класифікації електроізоляційних матеріалів.

Якщо враховувати тільки температуру, як руйнівний ізоляцію чинник, то довговічність ізоляції наближено можна визначити за законом старіння Бюссінг:

$$T = T_0 e^{-\frac{\theta}{\Delta\theta}}, \quad (2.1)$$

де θ – температура нагрівання ізоляції °С; T – термін служби при температурі θ в роках; T_0 і $\Delta\theta$ – константи матеріалу.

Параметри для класу нагрівостійкості ізоляції А і Н наведені нижче:

$A - \Delta\theta = 8$ °С; $B - \Delta\theta = 10$ °С; $H - \Delta\theta = 12$ °С; $T_0 = 6,225 \cdot 10^4$ років.

Чим вищий клас ізоляції, тим повільніше відбувається її старіння при даній температурі. Теплостійкі полімерні діелектрики, такі як фторопласт або кремній-органіка, мало схильні до термоокислювального руйнування, в той час як, наприклад, ізоляційні матеріали на основі целюлози, що відносяться до класу А, містять реактивні групи, які легко окислюються і тому їх старіння в міру підвищення температури відбувається значно швидше.

Хід роботи

Дослідження можуть проводитися на лабораторних стендах із трансформаторами або перетворювачами обертовими електричними машинами, забезпеченими пристроями вимірювання температури.

У первинний ланцюг трансформатора підключається вольтметр, амперметр і ватметр, у вторинний – навантажувальний опір, амперметр і

вольтметр. Термопара, що підключається до вольтметра, має бути закладена в зоні обмотки з максимальною температурою.

Необхідно суворо дотримуватися послідовності збільшення потужності. Це пов'язано з тим, що під час переходу від більшої потужності до меншої на очікування стабілізації температури витрачається велика кількість часу.

Рекомендації щодо обробки результатів

1. Проводиться послідовне навантаження трансформатора потужностями, зазначеними в таблиці 2.1. Роботу трансформатора при кожній потужності здійснювати до повної стабілізації температури, не менше 15 хв.

Таблиця 2.1 – Значення потужностей на трансформаторі

P	0,25 P _н	0,5 P _н	0,75 P _н	P _н	1,1 P _н

2. Виконати розрахунок терміну служби ізоляції трансформатора за умови, що клас ізоляції – В:

$$T = 6,225 \cdot 10^4 e^{-\frac{\theta}{10}}, \text{ (роки).}$$

3. За результатами розрахунків заповнити таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення терміну служби ізоляції трансформатора

θ	0,25 θ	0,5 θ	0,75 θ	1,0 θ	1,1 θ
T					

4. Побудувати графік залежності $T = f(\theta)$.

5. Провести розрахунки терміну служби ізоляції класів А і Н, а результати подати у вигляді графіка залежності $T = f(\theta)$.

Зміст звіту

1. Титульна сторінка із зазначенням теми лабораторної роботи.

2. Мета, короткі теоретичні відомості.
3. Опис виконання лабораторної роботи.
4. Висновки щодо виконаної роботи.

Контрольні питання

1. Що називається термінами служби ізоляції?
2. Дайте визначення теплостійкості ізоляції.
3. Дайте визначення нагрівостійкості ізоляції.

Лабораторна робота № 3

Тема. Визначення параметрів двигуна постійного струму за методом планування експерименту першого порядку

Мета: експериментальне визначення математичної моделі розглянутого процесу на підставі методу планування експерименту, порівняння розрахованої статичної характеристики з характеристиками, побудованими за паспортними даними двигуна.

Короткі теоретичні відомості

Під час проведення дослідження будь-якого об'єкта існує два можливі підходи: звичайний (зняття значень кожного разу та подальша їх обробка) та планування експерименту.

Сутність методу планування експерименту першого порядку полягає у виборі кількості та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для одержання математичної моделі розглянутого процесу із заданою точністю. Точність математичної моделі встановлює розбіжність розрахованих за математичною моделлю та отриманих експериментально величин і залежить від конкретних умов практичного застосування розрахункових величин.

Хід роботи

Відповідно до завдання на лабораторну роботу задаються паспортні дані (додаток А) двигуна постійного струму (P, U, n, R, L, η), за допомогою яких розраховують відсутні необхідні параметри двигуна (w, I, kF, M_n, J).

У математичному пакеті *MathCAD* складається програма визначення матриці значень необхідних величин у такій послідовності:

1. Задання за допомогою генератора випадкових чисел (функція *rnd*) змінних значень параметрів M_c і kF_c у вигляді:

$$M_c := M_n + rnd(0.025M_n); \quad (3.1)$$

$$kF_c := kF_n + rnd(0.025kF_n). \quad (3.2)$$

2. Задаються граничні значення інтервалу зміни часу: $t_n := 0$, $t_k := 1$, крок дискретизації $N := 500$ і вектор початкових умов $Y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, у якому перше значення відповідає струму якоря, а друге – швидкості обертання двигуна.

3. Задаємо систему рівнянь, що описує двигун постійного струму у вигляді:

$$D(t, Y) := \begin{bmatrix} (U - Y_0 \cdot R - kF_c \cdot Y_1) \cdot \frac{I}{L} \\ (Y_0 \cdot kF_c - M_c) \cdot \frac{I}{J} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

4. Для обчислення використовуємо метод Рунге-Кутта, що описується функцією $Z := rkfixed(Y, t_n, t_k, N, D)$. У результаті одержуємо матрицю значень, стовпці якої відповідають величинам: $t := Z^{(0)}$, $I := Z^{(1)}$, $w := Z^{(2)}$.

5. Будуємо перехідні характеристики струму якоря та швидкості обертання заданого двигуна.

6. Проводять досліди, за якими визначають числові значення струму I та швидкості обертання w у сталому режимі; отримані дані заносять до матриці експерименту (табл. 3.1).

7. За наведеною нижче методикою розраховують математичні моделі, що зображують перехідний процес у двигуні постійного струму за струмом якоря та швидкістю обертання.

8. За отриманою математичною моделлю відновлюються сигнали I та w і порівнюються з отриманими характеристиками первісним шляхом. За результатами порівняння робиться висновок щодо точності розглянутого методу діагностики електромеханічних систем.

Рекомендації щодо обробки результатів

1. Задаємося параметрами оптимізації – струмом якоря та швидкістю досліджуваного двигуна; факторами експерименту – зміною моменту M_c та магнітного потоку kF_c .

Будь-яка функція може бути зображена поліномом, розкладеним у ряд Тейлора. У нашому випадку поліном має вигляд:

$$y \approx a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2. \quad (3.4)$$

2. Приймаємо, що параметри змінюються на двох рівнях – максимальному x_i^{max} та мінімальному x_i^{min} .

За кількістю перемінних k та кількістю рівнів зміни параметрів p планується матриця експерименту (табл. 3.1), кількість рядків якої визначається за виразом: $N = p^k = 4$.

Величини в матриці записуються кодованими відповідно до виразу:

$$x_i^m = \frac{x_i - \bar{x}_i}{J_i}, \quad (3.5)$$

де x_i – реальне значення; \bar{x}_i – середнє значення; J_i – інтервал зміни параметру.

Фактор, щодо якого границі області зміни вхідного параметру симетричні, називається нульовим рівнем.

Таблиця 3.1 Матриця та результати планованого повного факторного експерименту

Кодування факторів і номери дослідів	Фактори експерименту		Параметр оптимізації		
	x_1	x_2	Дослід 1 – y_1	Дослід 2 – y_2	Середнє значення – y_{cp}
Верхній рівень $+1$					
Нульовий рівень 0					
Нижній рівень -1					
Інтервал J					
№ дослідів	1	+	+		
	2	-	+		
	3	+	-		
	4	-	-		

Інтервалом варіювання (зміни) фактору називається таке його значення, додаток якого до нульового рівня дає верхній, а вирахування – нижній рівні факторів.

3. Обчислюють дисперсії в кожному горизонтальному рядку матриці у кожному досліді (табл. 3.2):

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{k - 1}, \quad (3.6)$$

де k – кількість повторень в досліді; i – порядковий номер досліді в матриці.

Таблиця 3.2 – Розрахунок дисперсій за матрицею експерименту

№ дослідів	y_1	y_2	y_{cp}	$\sum_1^2 (y_i - \bar{y}_i)^2$	\tilde{y}_i	$\sum_i^N (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2$
1						
2						
3						
4						
Суми дисперсій розрахунків				Σ		Σ

4. Перевірка гіпотези про однорідність дисперсій.

Під час проведення експерименту необхідно прагнути, щоб результати кожного дослідження були вимірювані з однаковою точністю. Для перевірки цього положення використовують припущення про однорідність дисперсій параметру оптимізації. Перевірка гіпотези однорідності дисперсій здійснюється за критерієм Кохрена (відношення максимальної дисперсії в досліді до суми всіх дисперсій експерименту):

$$G_{max} = \frac{S_{i_{max}}^2}{\sum S_i^2}, \quad (3.7)$$

де $S_{i_{max}}^2$ – максимальне значення дисперсії в проведених досліді; $\sum S_i^2$ – сума значень дисперсій у всіх досліді.

Якщо виконується нерівність $G_{max} \leq G_{табл}(f_1, f_2)$ для значень ступенів свободи $f_1 = k-1$, $f_2 = N$ та заданого рівня значущості (звичайно його приймають $q = 5\%$), то гіпотеза про однорідність дисперсій приймається, тобто експеримент виконаний у всіх досліді зі статично однаковою точністю.

5. Визначення коефіцієнтів у рівнянні регресії.

Розрахунок коефіцієнтів регресії лінійних членів моделі виконується за формулою:

$$a_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad (3.8)$$

де x_i – кодоване значення фактору в i -тому досліді; \bar{y}_i – середнє значення параметру оптимізації у тому самому досліді.

Для визначення вільного члена в рівнянні регресії беруть середнє арифметичне всіх середніх значень параметра оптимізації в матриці:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}. \quad (3.9)$$

Коефіцієнти регресії, що характеризують взаємодії факторів, визначаються за формулою:

$$a_{ij} = \frac{\sum_{i=j=1}^N x_i x_j \bar{y}_i}{N}. \quad (3.10)$$

Підставляючи значення у вирази (3.8)–(3.10), визначаємо коефіцієнти регресії.

6. Визначення значущості коефіцієнтів регресії.

Перевіримо значущість коефіцієнтів регресії порівнянням їх величини зі значенням довірчих інтервалів $\pm a_i$, що у розглянутому прикладі рівні для всіх коефіцієнтів.

Дисперсія відтворюваності результатів експерименту:

$$S_y^2 = \frac{\sum S_i^2}{N}. \quad (3.11)$$

Довірчий інтервал зміни коефіцієнтів регресії:

$$\Delta a_i = \pm t \cdot \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \quad (3.12)$$

де $t = 2,77$ – табличне значення критерію Стьюдента (з кількістю ступенів свободи, рівній чотирьом).

Коефіцієнт регресії вважається значущим, якщо його абсолютне значення перевищує величину довірчого інтервалу. Якщо при цьому деякі коефіцієнти виявилися незначущими, то відразу відкидати їх не рекомендується. Спочатку варто спробувати одержати точнішу оцінку значущості відповідних коефіцієнтів, повторивши експеримент зі зміною інтервалу варіювання для цих коефіцієнтів (збільшивши їх, наприклад, у два рази). Також доцільно поєднати отримані незначні впливи деяких коефіцієнтів із загальними теоретичними відомостями про процес.

Отже, отримане рівняння регресії у вигляді (3.4) після відсіювання незначущих коефіцієнтів регресії набуває більш спрощеного вигляду і є математичною моделлю розглянутого процесу.

7. Перевірка адекватності моделі.

Після одержання математичної моделі процесу необхідно перевірити гіпотезу адекватності прийнятої моделі реальному процесу. Перевірка здійснюється за критерієм Фішера, обумовленим з виразу:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (3.13)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності, що визначається за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \tilde{y}_i)^2}{N - k_0 - 1}, \quad (3.14)$$

де k_0 – значення параметра оптимізації, отримане розрахунком за рівнянням регресії, з якого виключені всі незначущі члени; \tilde{y}_i – фактичне значення параметра оптимізації, отримане з математичної моделі розглянутого процесу шляхом підстановки відповідних значень кодованих факторів з табл. 3.1.

Отримана величина критерію Фішера порівнюється з його табличним значенням, яке для вибраного рівня значущості (звичайно 5 %) та кількості

ступенів свободи $f_1 = N$ і $f_2 = N - k_0 - 1$ дорівнює $F = 6.9$. Якщо розрахункове значення критерію Фішера менше за його табличне значення, то приймається гіпотеза адекватності математичної моделі експериментальним даним.

8. Перевірка необхідності планування другого порядку.

Перевірка необхідна й у випадку, якщо в отриманому рівнянні регресії хоча б один коефіцієнт з парними взаємодіями виявився значущим. Необхідність планування другого порядку оцінюється за внеском у величину параметра оптимізації коефіцієнтів багаточлена другого та більшого ступенів. Оцінка суми коефіцієнтів із квадратичними і вищими ступенями визначається за величиною різниці між вільним членом a_0 у рівнянні регресії та середнім значенням \bar{y}_0 , отриманим з додаткових до матриці дослідів у центрі експерименту (додаткові досліди проводяться за нульових кодованих значень усіх факторів).

Значущість різниці оцінюється за критерієм Стьюдента:

$$t = \frac{a_0 - \bar{y}_0}{\sqrt{S_y^2}} \cdot \sqrt{N}, \quad (3.15)$$

де S_y^2 – отримана раніше дисперсія, що характеризує помилку дослідів.

Отримане значення критерія Стьюдента порівнюється з його табличним значенням, обумовленим кількістю ступенів свободи $f_1 = N$.

Якщо отримане значення критерію Стьюдента менше табличного, то це свідчить про статистичну незначущість квадратичних членів; тому можна обмежитися отриманим рівнянням регресії. У протилежному випадку виконується планування експерименту другого порядку.

Після одержання рівняння математичної моделі розглянутого процесу відновлюються сигнали струму якоря та швидкості обертання двигуна і порівнюються з отриманими характеристиками первісним шляхом. За результатами порівняння робиться висновок щодо точності розглянутого методу діагностики електромеханічних систем.

Зміст звіту

1. Паспортні та розрахункові параметри заданого двигуна постійного струму.
2. Перехідні характеристики струму якоря та швидкості обертання, побудовані за наведеною методикою в математичному пакеті *MathCAD*.
3. Матриці експерименту для обох випадків.
4. Розрахунок відповідних математичних моделей і перевірка адекватності отриманих моделей.
5. Побудова характеристик сигналів струму та швидкості за математичною моделлю.
6. Висновки щодо порівняння отриманих характеристик з первісними характеристиками.

Контрольні питання

1. У чому полягає сутність методу планування експерименту?
2. Відповідно до яких правил планується матриця експерименту?
3. Яким чином і з якою метою застосовується критерій Кохрена?
4. За якими залежностями визначаються коефіцієнти в рівнянні регресії?
5. Яким чином визначають значущість коефіцієнтів регресії?
6. Яке положення перевіряється за критерієм Фішера?
7. Яким чином виконується перевірка необхідності планування другого порядку?

Лабораторна робота № 4

Тема. Вивчення процесу відтворення сигналу швидкості обертання двигуна постійного струму за відомим сигналом струму якоря у пусковому режимі

Мета: експериментальне відтворення сигналу швидкості обертання за сигналом струму у пусковому режимі для випадків математичного моделювання та експериментального дослідження.

Короткі теоретичні відомості

Як відомо, двигун постійного струму незалежного збудження описується системою двох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot R + k\Phi \cdot \omega = U; \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = i \cdot k\Phi - M_c. \end{cases} \quad (4.1)$$

Оскільки необхідно відтворити сигнал швидкості обертання двигуна за сигналом струму якоря, то достатньо другого рівняння системи (4.1), яке зображуємо у вигляді:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (i \cdot k\Phi - M_c). \quad (4.2)$$

Для розрахунків використовуємо модифікований метод Ейлера, суть якого полягає в тому, що для оцінювання наступної точки функції $\tilde{y} = f(x)$ використовується лише один лінійний член у формулі Тейлора, тобто:

$$y_1 = y(x_0 + h) = y_0 + h \cdot f(x_0, y_0), \quad (4.3)$$

де $f(x_0, y_0)$ – права частина диференційного рівняння $y' = f(x)$; h – крок квантування.

Користуючись значенням y_1 з розкладу $y(x)$ у h -окілу точки $x_1 = x_0 + h$, одержують значення:

$$y_2 = y(x_0 + 2 \cdot h) = y_1 + h \cdot f(x_1, y_1).$$

Цей процес розповсюджується на наступні кроки:

$$y_{i+1} = y(x_0 + i \cdot h) = y_i + h \cdot f(x_i, y_i). \quad (4.4)$$

Отже, диференційне рівняння першого порядку за методом Ейлера обчислюється за формулою (4.4).

Тобто для нашого випадку вираз (4.4) матиме вигляд:

$$\omega_{j+1} = \omega_j + h \cdot \frac{1}{J} \cdot (i_j \cdot k\Phi - M_c). \quad (4.5)$$

Хід роботи

1. Лабораторна робота виконується на лабораторному стенді № 1 (аудиторія № 2105а), функціональна схема та технічний опис якого наведені у додатку Б.

2. Складають відповідну експериментальну установку, на якій проводять пусковий режим досліджуваної електричної машини. Пуск двигуна проводять одночасно з вимірюванням гармонійних сигналів струму та швидкості за допомогою комп'ютеризованого вимірювально-діагностичного комплексу.

3. За наведеною нижче методикою відтворюється сигнал швидкості за відомим сигналом струму та порівнюється з отриманим експериментальним сигналом швидкості в пусковому режимі.

4. Аналогічним шляхом відновлюється сигнал швидкості та порівнюється з побудованим сигналом швидкості для двигуна постійного струму, що був заданий у лабораторній роботі № 3.

5. За результатами порівняння для обох випадків роблять відповідні висновки.

Рекомендації щодо обробки результатів

Після отримання експериментальних даних процесу пуску двигуна в математичному пакеті *MathCAD* складається програма зчитування масиву значень з текстового файлу (вбудована функція *READPRN* або команда *Insert Component*) та будуються експериментальні характеристики зміни струму якоря та швидкості обертання досліджуваної електричної машини.

Для більш достовірного відтворення сигналу швидкості отримані експериментальні залежності необхідно згладити за допомогою функції *supsmooth* (*ux, uy*).

Далі задають початкові умови розрахунку:

- крок квантування $h := \frac{1}{N}$, де N – кількість точок вимірювання,

знятих за допомогою вимірювально-діагностичного комплексу;

- інтервал зміни сигналу $i := 0..N$;
- початкове значення швидкості обертання $\omega_0 := 0$;
- вираз похідної швидкості $y_i := \frac{I_{ya} \cdot kF - M_c}{J}$ та безпосередньо

залежність зміни сигналу швидкості за формулою Ейлера: $\omega_{i+1} := \omega_i + h \cdot y_i$.

Порівнюють отриманий експериментально сигнал швидкості з відтвореним за методом Ейлера (приблизний вигляд отриманих результатів наведений на рис. 4.1).

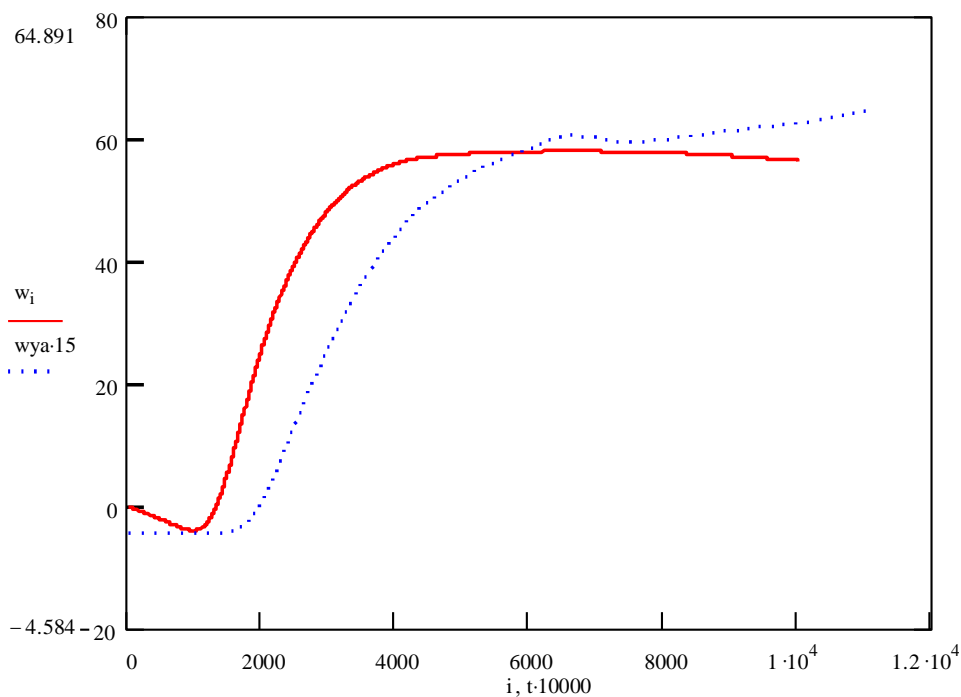


Рисунок 4.1 – Приблизний вигляд характеристик швидкості обертання двигуна для експериментальних даних

Для двигуна постійного струму, заданого у лабораторній роботі № 3, необхідно побудувати характеристики перехідного процесу (див. лабораторну роботу № 3); задатися кількістю точок розрахунку N ; інтервалом вимірювання

t_n та t_k , при цьому кінцеве значення інтервалу вибирається для сталого режиму зміни струму та швидкості та відповідним кроком квантування $h := \frac{t_k}{N}$.

Аналогічним шляхом розраховується за формулою Ейлера закон зміни швидкості обертання двигуна та порівнюються отримані характеристики (приблизний вигляд яких наведений на рис. 4.2).

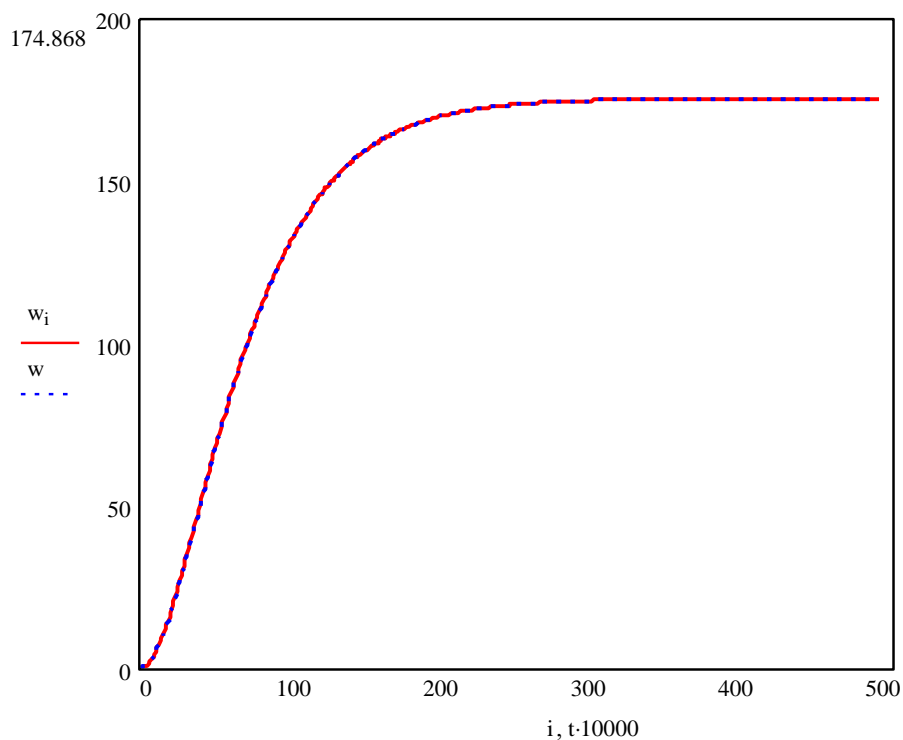


Рисунок 4.2 – Приблизний вигляд характеристик швидкості обертання двигуна для математичного моделювання

Зміст звіту

1. Тема та мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості щодо особливостей відтворення сигналу швидкості за методом Ейлера.
3. Функціональна схема експериментальної установки.
4. Навести приклад програми відтворення сигналу швидкості для випадків експериментального та математичного визначення сигналу струму якоря двигуна.

5. Навести характеристики експериментального та відтвореного сигналу швидкості для обох випадків.

6. Висновки щодо виконаної роботи.

Контрольні питання

1. У чому полягає сутність модифікованого методу Ейлера?

2. Який вигляд матиме диференційне рівняння першого порядку за методом Ейлера для випадку, коли розглядається ДПС незалежного збудження?

3. Яким чином виконується згладжування сигналів та за якою умовою обирається крок квантування?

Лабораторна робота № 5

Тема. Ідентифікація параметрів двигуна постійного струму методом енергодіагностики за системою ТП – Д типу «КЕМРОН»

Мета: скласти рівняння балансу ортогональних складових миттєвої потужності для досліджуваної схеми заміщення, за допомогою яких визначити параметри схеми за методом енергодіагностики.

Короткі теоретичні відомості

Схеми заміщення електромеханічних систем розглядаються достатньо наближено, оскільки базуються на лінійних моделях, котрі не враховують параметри елементів, вихідні координати яких залежать від двох і більше вхідних величин. У питаннях, пов'язаних з випробуванням електромеханічних систем, такі спрощення є неприпустимими.

Повні схеми заміщення машин постійного струму аналізуються під час детальних випробувань. У звичайній практиці, якою є і навантаження машин, виправдане використання спрощеної схеми заміщення, у якій двигун постійного струму розглядають як електронний аналог – коливальне коло з відомими активним опором, ємністю та індуктивністю (рис. 5.1), при цьому момент неробочого ходу двигуна не враховується.

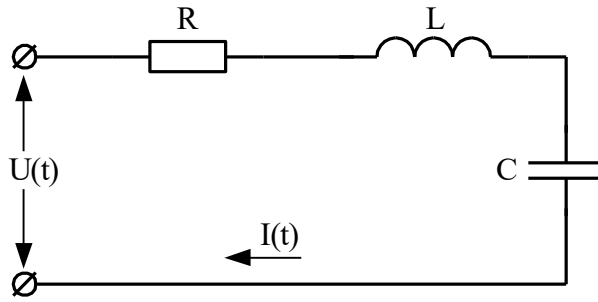


Рисунок 5.1 – Спрощена схема заміщення якірного кола двигуна постійного струму

Розглянемо метод енергодіагностики щодо джерела живлення, активна потужність якого визначається напругою $U(t)$ та струмом $i(t)$:

$$P(t) = U(t) \cdot i(t). \quad (5.1)$$

Уважаємо, що у дослідженні процесу визначений період його повторення та залежності $U(t)$ та $i(t)$ зображені за допомогою рядів Фур'є:

$$U(t) = \sum_{n=0}^{k_u} U_n \cdot \cos(\Omega_n t + \varphi_n), \quad i(t) = \sum_{m=0}^{k_i} i_m \cdot \cos(\Omega_m t - \varphi_m), \quad (5.2)$$

де U_n, i_m – амплітуди складових напруги та струму; φ_n, φ_m – фазові кути.

Перетворення залежностей (5.2) дозволяє подати їх у такому вигляді:

$$U(t) = \sum_{n=0}^{k_u} U_{a_n} \cdot \cos \Omega_n t + \sum_{n=0}^{k_u} U_{b_n} \cdot \sin \Omega_n t \quad (5.3)$$

$$i(t) = \sum_{m=0}^{k_i} i_{a_m} \cdot \cos \Omega_m t + \sum_{m=0}^{k_i} i_{b_m} \cdot \sin \Omega_m t.$$

Тобто, миттєва потужність дорівнює добутку двох гармонічних рядів (5.3). Після перетворення та спрощення вираз для миттєвої потужності матиме вигляд:

$$P(t) = P_0 + \sum_{k=1}^{m+n} P_{k_a} \cdot \cos(\Omega k t) + \sum_{k=1}^{m+n} P_{k_b} \cdot \sin(\Omega k t), \quad (5.4)$$

де P_0 – постійна складова потужності; P_{k_a}, P_{k_b} – амплітуди косинусної та синусної складових.

Коефіцієнти P_0, P_{k_a}, P_{k_b} можуть бути отримані аналітичним шляхом або за допомогою різних математичних пакетів. У цьому випадку діючий сигнал дискретизується на інтервалі дослідження на кінцеву кількість значень.

Після перетворення масивів значень, що будуть отримані за допомогою вимірювально-діагностичного комплексу методом дискретного перетворення Фур'є, залежності (5.3) матимуть вигляд:

$$U(t) = a_{u_0} + \sum_{k=1}^N a_{u_k} \cdot \cos \Omega_k t + \sum_{k=1}^N b_{u_k} \cdot \sin \Omega_k t; \quad (5.5)$$

$$i(t) = a_{i_0} + \sum_{k=1}^N a_{i_k} \cdot \cos \Omega_k t + \sum_{k=1}^N b_{i_k} \cdot \sin \Omega_k t, \quad (5.6)$$

де $a_{i_0}, a_{u_0}, a_{i_k}, a_{u_k}, b_{i_k}, b_{u_k}$ – коефіцієнти дискретного розподілу Фур'є.

Якщо враховуються 1, 3, 5 та 7 гармоніки миттєвих значень напруги та струму, вираз для миттєвої потужності матиме вигляд:

$$P(t) = a_{P_0} + \sum_{k=2,4,6,8,10,12,14} [a_{P_k} \cdot \cos(\Omega k t) + b_{P_k} \cdot \sin(\Omega k t)], \quad (5.7)$$

де значення коефіцієнтів $a_{P_0}, a_{P_k}, b_{P_k}$ змінюються залежно від типу та кількості елементів, що входять до схеми заміщення.

Отриманий вираз для миттєвої потужності у формі (5.7) характерний для джерел живлення. Для інших елементів електротехнічних пристроїв ця залежність матиме вигляд:

– для активного опору $P_R(t) = i^2(t) \cdot R$; (5.8)

– для ненасичуваної індуктивності $P_L(t) = L \cdot i(t) \cdot \frac{di(t)}{dt}$; (5.9)

– для нелінійної індуктивності $P_L(t) = i(t) \cdot \frac{d}{dt} \{L(t) \cdot i(t)\}$; (5.10)

– для ненасичуваної ємності $P_C(t) = \frac{1}{C} \cdot i(t) \cdot \int i(t) dt$; (5.11)

– для нелінійної ємності $P_{C(t)}(t) = i(t) \cdot \int \frac{i(t)}{C(t)} dt$. (5.12)

Хід роботи

1. Проведення лабораторної роботи відбувається на лабораторному стенді № 2 (аудиторія № 2105а), функціональна схема та технічне описання якого наведені у додатку В.

2. Складають відповідну експериментальну установку, на якій проводять динамічне навантаження досліджуваної електричної машини шляхом зміни якірної напруги.

3. Провести вимірювання гармонійних сигналів струму та напруги якірного кола за допомогою вимірювально-діагностичного комплексу.

4. Отримані значення подати у вигляді сигналів, розкладених у ряд Фур'є.

5. Скласти рівняння балансу потужностей для схеми заміщення відповідної електромеханічної системи з полігармонічною зміною якірної напруги.

6. Визначити параметри схеми заміщення за методом енергодіагностики.

Рекомендації щодо обробки результатів

Під час виконання лабораторної роботи необхідно провести динамічне навантаження досліджуваної електричної машини. Розглянемо послідовність формування законів керування в системі навантаження з впливом на напругу якоря і незмінним потоком збудження. Параметри швидкості обертання і струму якоря задаємо у вигляді:

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_v \cdot \sin(\Omega_\omega \cdot t); i_\pi(t) = i_0 + i_v \cdot \sin(\Omega_i \cdot t + \varphi), \quad (5.13)$$

причому $\omega|_T = \sqrt{\omega_0^2 + \frac{\omega_v^2}{2}} \approx \omega_H; i_\pi|_T = \sqrt{i_0^2 + \frac{i_v^2}{2}} \approx I_H.$

Відповідно до рівняння механічної рівноваги, струм якоря зі зміною напруги якоря і постійним потоком:

$$i_\pi(t) = \frac{J}{k\Phi} \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{a}{k\Phi} \cdot \omega(t). \quad (5.14)$$

З урахуванням закону зміни швидкості, струм якоря:

$$i_\pi(t) = \frac{J}{k\Phi} \cdot \omega_v \cdot \Omega_\omega \cdot \cos(\Omega_\omega \cdot t) + \frac{a}{k\Phi} \cdot \omega_0 + \frac{a}{k\Phi} \cdot \omega_v \cdot \sin(\Omega_\omega \cdot t), \quad (5.15)$$

причому $i_0 = \frac{a}{k\Phi} \cdot \omega_0,$ (5.16)

$$i_v \cdot \sin(\Omega_i \cdot t + \varphi) = \frac{J}{k\Phi} \cdot \omega_v \cdot \Omega_\omega \cdot \cos(\Omega_\omega \cdot t) + \frac{a}{k\Phi} \cdot \omega_v \cdot \sin(\Omega_\omega \cdot t) \quad (5.17).$$

Перемінна складова струму якоря визначається з виразу (5.18):

$$i_v = \sqrt{2 \cdot (I_H^2 + i_0^2)} = \sqrt{2 \cdot \left(I_H^2 - \left(\frac{a}{k\Phi} \cdot \omega_0 \right)^2 \right)}. \quad (5.18).$$

Отже амплітуда перемінної складової швидкості, відповідно до виразу, (5.19) дорівнює:

$$\omega_v = \frac{i_v \cdot k\Phi}{\sqrt{J^2 \cdot \Omega_\omega^2 + a^2}}. \quad (5.19)$$

При цьому частоти перемінних складових струму якоря й швидкості обертання однакові. Відповідно до норм перевищення швидкості обертання електричної машини під час випробовувань не повинно перевищувати 20 % від номінальної швидкості. У випадку, якщо із заданою перемінною складовою струму якоря перемінна складова швидкості обертання перевищує встановлене значення, то її зниження може бути здійснене, відповідно до виразу (5.19), збільшенням частоти впливу $\Omega_{\omega} = \Omega_i$. При цьому різниця фаз перемінних складових струму якоря і швидкості обертання також змінюється:

$$\varphi = \arctg \frac{J \cdot \Omega_{\omega}}{a}.$$

Закон зміни напруги якоря, що дозволяє реалізувати режим із заданими параметрами струму і швидкості обертання, визначається рівнянням електричної рівноваги якірної кола:

$$u_{\text{я}}(t) = L \cdot i_{\text{в}} \cdot \Omega_i \cdot \cos(\Omega_i \cdot t + \varphi) + R_{\text{я}} \cdot i_{\text{в}} \cdot \sin(\Omega_i \cdot t + \varphi) + R_{\text{я}} \cdot i_0 + k\Phi \cdot \omega_0 + k\Phi \cdot \omega_0 \cdot \sin(\Omega_{\omega} \cdot t). \quad (5.20)$$

Після проведення експериментальних досліджень отримані сигнали струму та напруги якірної кола за допомогою написаної у математичному пакеті *MathCAD* програми (додаток Г) зображують у вигляді сигналів, розкладених у ряд Фур'є.

Потім за методом енергодіагностики складається система рівнянь балансу потужностей для схеми заміщення даної електромеханічної системи з полігармонічною зміною якірної напруги.

Оскільки вважаємо, що досліджувана схема заміщення зображується у вигляді спрощеної схеми (рис. 5.1), то невідомими параметрами є активний опір R , індуктивність L та ємність C . Для визначення невідомих параметрів достатньо першої та другої гармонійних складових напруги та струму:

$$U(t) = a_{u0} + a_{u1} \cdot \cos \Omega t + a_{u2} \cdot \cos 2\Omega t + b_{u1} \cdot \sin \Omega t + b_{u2} \cdot \sin 2\Omega t; \quad (5.21)$$

$$i(t) = a_{i_0} + a_{i_1} \cdot \cos \Omega t + a_{i_2} \cdot \cos 2\Omega t + b_{i_1} \cdot \sin \Omega t + b_{i_2} \cdot \sin 2\Omega t. \quad (5.22)$$

Для розглянутої схеми заміщення потужність джерела живлення визначається з виразу $S_u(t) = U(t) \cdot i(t)$, а потужність, що споживається:

$$S(t) = i^2(t) \cdot R + L \cdot i(t) \cdot \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i(t) \int i(t).$$

З рівняння балансу потужностей відповідно отримуємо:

$$U(t) \cdot i(t) = i^2(t) \cdot R + L \cdot i(t) \cdot \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i(t) \int i(t). \quad (5.23)$$

Розпишемо кожен складову у виразі (5.23), використовуючи залежності для напруги та струму (5.21)–(5.23):

$$\begin{aligned} U(t) \cdot i(t) = & \frac{1}{2} \cdot (a_{u_1} \cdot a_{i_1} + a_{u_2} \cdot a_{i_2} + b_{u_1} \cdot b_{i_1} + b_{u_2} \cdot b_{i_2} + 2a_{u_0}) + \\ & + \frac{1}{2} \cos \Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot a_{i_2} + a_{u_2} \cdot a_{i_1} + b_{u_1} \cdot b_{i_2} + b_{u_2} \cdot b_{i_1} + 2a_{u_0} + 2a_{i_0}) + \\ & + \frac{1}{2} \cos 2\Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot a_{i_1} - b_{u_1} \cdot b_{i_1} + 2a_{u_0} a_{i_2} + 2a_{u_2} a_{i_0}) + \\ & + \frac{1}{2} \sin \Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot b_{i_2} + b_{u_2} \cdot a_{i_1} - a_{u_2} \cdot b_{i_1} - b_{u_1} \cdot a_{i_2} + 2a_{u_0} b_{i_1} + 2b_{u_1} a_{i_0}) + \\ & + \frac{1}{2} \sin 2\Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot b_{i_1} + b_{u_1} \cdot a_{i_1} + 2a_{u_0} b_{i_2} + 2b_{u_2} a_{i_0}); \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} i^2(t) \cdot R = & R \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (2a_{i_0}^2 + a_{i_1}^2 + a_{i_2}^2 + b_{i_1}^2 + b_{i_2}^2) + \cos \Omega t \cdot (2a_{i_0} a_{i_1} + \right. \\ & a_{i_1} a_{i_2} + b_{i_1} b_{i_2}) + \frac{1}{2} \cos 2\Omega t \cdot (a_{i_0} a_{i_2} + a_{i_1}^2 - b_{i_1}^2) + \sin \Omega t \cdot (2a_{i_0} b_{i_1} + \\ & \left. + a_{i_1} b_{i_2} - b_{i_1} a_{i_2}) + \sin 2\Omega t \cdot (2a_{i_0} b_{i_2} + a_{i_1} b_{i_1}) \right]; \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} L \cdot i(t) \cdot \frac{di(t)}{dt} = & L \cdot \left[\frac{\Omega}{2} \cos \Omega t \cdot (a_{i_1} b_{i_2} - a_{i_2} b_{i_1} + 2b_{i_1} a_{i_0}) + \Omega \cos 2\Omega t \times \right. \\ & \times (a_{i_1} b_{i_1} + 2b_{i_2} a_{i_0}) - \frac{\Omega}{2} \sin \Omega t \cdot (b_{i_1} b_{i_2} + a_{i_1} a_{i_2} + 2a_{i_0} a_{i_1}) - \frac{\Omega}{2} \sin 2\Omega t \times \\ & \left. \times (a_{i_1}^2 - b_{i_1}^2 + 4a_{i_0} a_{i_2}) \right]; \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{C} \cdot i(t) \int i(t) dt = \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{4\Omega} \cos \Omega t \cdot (a_{i_1} b_{i_2} - a_{i_2} b_{i_1}) - \frac{a_{i_1} b_{i_1}}{\Omega} \cos 2\Omega t - \right. \\ \left. - \frac{1}{4\Omega} \sin \Omega t \cdot (a_{i_1} a_{i_2} + b_{i_1} b_{i_2}) + \frac{1}{4\Omega} \sin 2\Omega t \cdot (a_{i_2}^2 - b_{i_2}^2) \right]. \end{aligned} \quad (5.27)$$

Уведемо деякі припущення: на третій та четвертій гармонійних складових коефіцієнти проігноруємо, вважаючи їх надлишковими; а також відомо, що на ємності постійна складова струму дорівнює нулю.

Використовуючи отримані вирази (5.24)–(5.27), запишемо систему рівнянь для визначення параметрів схеми заміщення згідно зі складовими миттєвої потужності:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot (a_{u_1} \cdot a_{i_1} + a_{u_2} \cdot a_{i_2} + b_{u_1} \cdot b_{i_1} + b_{u_2} \cdot b_{i_2} + 2a_{u_0}) = \\ = \frac{1}{2} \cdot R \cdot (2a_{i_0}^2 + a_{i_1}^2 + a_{i_2}^2 + b_{i_1}^2 + b_{i_2}^2); \end{aligned} \quad (5.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cos \Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot a_{i_2} + a_{u_2} \cdot a_{i_1} + b_{u_1} \cdot b_{i_2} + b_{u_2} \cdot b_{i_1} + 2a_{u_0} + 2a_{i_0}) = \\ = R \cdot [\cos \Omega t \cdot (2a_{i_0} a_{i_1} + a_{i_1} a_{i_2} + b_{i_1} b_{i_2})] + L \cdot \left[\frac{\Omega}{2} \cos \Omega t \times \right. \\ \left. \times (a_{i_1} b_{i_2} - a_{i_2} b_{i_1} + 2b_{i_1} a_{i_0}) \right] + \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{4\Omega} \cos \Omega t \cdot (a_{i_1} b_{i_2} - a_{i_2} b_{i_1}) \right]; \end{aligned} \quad (5.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cos 2\Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot a_{i_1} - b_{u_1} \cdot b_{i_1} + 2a_{u_0} a_{i_2} + 2a_{u_2} a_{i_0}) = \\ = R \cdot \left[\frac{1}{2} \cos 2\Omega t \cdot (a_{i_0} a_{i_2} + a_{i_1}^2 - b_{i_1}^2) \right] + L \cdot [\Omega \cos 2\Omega t \cdot (a_{i_1} b_{i_1} + 2b_{i_2} a_{i_0})] - \\ - \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{a_{i_1} b_{i_1}}{\Omega} \cos 2\Omega t \right]; \end{aligned} \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \sin \Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot b_{i_2} + b_{u_2} \cdot a_{i_1} - a_{u_2} \cdot b_{i_1} - b_{u_1} \cdot a_{i_2} + 2a_{u_0} b_{i_1} + 2b_{u_1} a_{i_0}) = \\ = R \cdot [\sin \Omega t \cdot (2a_{i_0} b_{i_1} + a_{i_1} b_{i_2} - b_{i_1} a_{i_2})] - L \cdot \left[\frac{\Omega}{2} \sin \Omega t \times \right. \\ \left. \times (b_{i_1} b_{i_2} + a_{i_1} a_{i_2} + 2a_{i_0} a_{i_1}) \right] - \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{1}{4\Omega} \sin \Omega t \cdot (a_{i_1} a_{i_2} + b_{i_1} b_{i_2}) \right]; \end{aligned} \quad (5.31)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \sin 2\Omega t \cdot (a_{u_1} \cdot b_{i_1} + b_{u_1} \cdot a_{i_1} + 2a_{u_0} b_{i_2} + 2b_{u_2} a_{i_0}) = \\ & = R \cdot [\sin 2\Omega t \cdot (2a_{i_0} b_{i_2} + a_{i_1} b_{i_1})] - L \cdot [\frac{\Omega}{2} \sin 2\Omega t \cdot (a_{i_1}^2 - b_{i_1}^2 + 4a_{i_0} a_{i_2})] + \quad (5.32) \\ & + \frac{1}{C} \cdot [\frac{1}{4\Omega} \sin 2\Omega t \cdot (a_{i_2}^2 - b_{i_2}^2)]. \end{aligned}$$

Для визначення параметрів схеми заміщення необхідно з отриманих експериментальних даних за допомогою розкладання їх у ряд Фур'є визначити ортогональні складові напруги та струму, підставити їх до отриманої (5.28)–(5.32) системи рівнянь і розв'язати її щодо коефіцієнтів $a_{i_0}, a_{u_0}, a_{i_1}, a_{u_1}, b_{i_1}, b_{u_1}, a_{i_2}, a_{u_2}, b_{i_2}, b_{u_2}$.

Рівняння балансу миттєвих значень потужності, складені для усіх можливих гармонік, є базовою системою для визначення параметрів схеми заміщення будь-якої електромеханічної системи, струмів і моментів у ній, не використовуючи проміжні обчислення струмів і напруг на елементах.

Зміст звіту

1. Тема та мета роботи.
2. Функціональна схема експериментальної установки.
3. Залежності струму та напруги якірного кола, побудовані за експериментальними даними.
4. Амплітудні значення коефіцієнтів розподілу Фур'є.
5. Спектрограми амплітуд і фазових кутів зсуву гармонійних сигналів струму та напруги.
6. Система рівнянь балансу потужностей для заданої схеми заміщення електромеханічної системи.
7. Визначення невідомих параметрів і висновки щодо порівняння паспортних і розрахункових даних.

Контрольні питання

1. Яким чином записати рівняння балансу потужностей для розглянутої схеми заміщення якірного кола двигуна постійного струму?

2. Який вигляд мають вирази щодо визначення миттєвої потужності на різних елементах електромеханічних систем?

3. Яким чином отримується система рівнянь, за якою визначаються параметри схеми заміщення?

Лабораторна робота № 6

Тема. Ідентифікація параметрів електроприводу постійного струму за перехідними характеристиками

Мета: експериментальне визначення динамічних параметрів електроприводу постійного струму за системою «тиристорний перетворювач–двигун» (ТП–Д).

Короткі теоретичні відомості

Для аналізу та синтезу систем електроприводів необхідно знати їх динамічні параметри. Як динамічний параметр у системі ТП–Д взято такі величини: опір двигуна, індуктивність якірного кола двигуна, еквівалентний активний опір кола обмотки збудження, індуктивність обмотки збудження, момент інерції приводу. Ці параметри, у свою чергу, визначають електромеханічну та електромагнітну постійні часу силового кола, що визначають характер перехідних процесів електроприводу.

Для визначення параметрів об'єкта виокремлюють п'ять основних методів, що базуються на:

- реакції об'єкта на детермінований вхідний сигнал (одиничний імпульс);
- частотних характеристиках, отриманих у сталому стані із синусоїдальним вхідним сигналом;
- моделюванні на ЕОМ з подальшим уточненням параметрів моделі;
- кореляції аналізу входу та виходу;
- динамічній моделі, що підстроюється (моделі як датчика характеристик об'єкта).

У лабораторній роботі розглянемо перший метод за перехідними характеристиками пуску електроприводу постійного струму.

Хід роботи

1. Проведення роботи відбувається на лабораторному стенді № 1 (аудиторія № 2105а). Ознайомитися з електричними машинами та приладами, необхідними для проведення роботи, записати паспортні дані двигунів, що входять до експериментальної установки.

2. Для проведення роботи необхідно зібрати досліджувану схему згідно з функціональною схемою, наведеною у додатку Б.

3. Дослідження перехідних характеристик відбувається таким чином. Змінюючи положення перемикача $SB1$, вибирається тип досліджуваної машини ($M1$ або Mz). Змінюючи напругу керування на тиристорних перетворювачах, що живлять обмотку збудження та якірне коло двигуна, виконується пуск досліджуваної машини.

4. За допомогою вимірювально-діагностичного комплексу фіксуються часові діаграми перехідного процесу для кожного з досліджуваних двигунів.

5. Обробити отримані характеристики для визначення значень електромеханічної та електромагнітної постійних часу.

6. Визначити індуктивності якірних кіл двигунів і моменти інерції.

Рекомендації щодо обробки результатів

1. Метод простору станів.

Случайні методики експериментального визначення параметрів електропривода за перехідними характеристиками використовуються для систем не більш, ніж другого порядку. Лінійну або лінеаризовану систему електроприводу можна описати векторно-матричним рівнянням вигляду:

$$\dot{X} = A \cdot X + B \cdot U, \quad (6.1)$$

де X , U – вектори стану і сторонніх впливів; A , B – матриці стану і керування.

Застосовуючи перетворення Фур'є й інтегруючи, можна одержати прості формули, за якими визначається зв'язок між двома послідовними різницями вектора стану X на інтервалі ΔT :

$$X_{n+1} - X_n = e^{A \cdot \Delta T} \cdot (X_n - X_{n-1}) - (E - e^{A \cdot \Delta T})^{-1} \cdot A \cdot B \cdot (U_n - U_{n-1}).$$

Розклавши отримане рівняння в ряд Тейлора за ступенями ΔT , одержимо:

$$X_{n+1} - X_n = X_n - X_{n-1} + \Delta T \cdot A \cdot (X_n - X_{n-1}) + \Delta T \cdot B \cdot (U_n - U_{n-1}).$$

Або точніше, рівняння, що відповідає кінцево-різницевій схемі Ейлера-Коші:

$$X_{n+1} - 2X_n + X_{n-1} = \frac{\Delta T}{2} [A \cdot (X_{n+1} - X_{n-1}) + B \cdot (U_{n+1} - U_{n-1})]. \quad (6.2)$$

Сформувавши матриці Q і R за формулами:

$$Q = X_{n+1} - X_{n-1}; \quad (6.3)$$

$$R = [(X_{n+1} - X_n) - (X_n - X_{n-1}) - \frac{\Delta T}{2} \cdot B \cdot (U_{n+1} - U_{n-1})], \quad (6.4)$$

а під час незмінних сторонніх впливів на суміжних інтервалах

$$R = (X_{n+1} - X_n) - (X_n - X_{n-1}), \quad (6.5)$$

$$\text{отримаємо } A = \frac{2}{\Delta T} \cdot R \cdot Q^{-1}. \quad (6.6)$$

Визначивши компоненти матриці A , перевіряємо виконання прийнятої умови $a_{jj} \cdot \Delta T \leq 1$. В іншому випадку зменшують ΔT і повторюють дослід.

Формування матриць виконується згідно з табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Формування матриці простору станів

Часовий інтервал t	0	ΔT	$2\Delta T$...	$n\Delta T$
Координати вектора	X_1	X_2	X_2	...	X_n
Номери стовпців матриць R і Q	–	1	2	...	n
Матриця Q	–	$X_2 - X_0$	$X_3 - X_1$...	$X_{n+1} - X_{n-1}$
Матриця R	–	$(X_2 - X_1) -$ $-(X_1 - X_0)$	$(X_3 - X_2) -$ $-(X_2 - X_1)$...	$(X_{n+1} - X_n) -$ $-(X_n - X_{n-1})$

Розглядаючи двигун постійного струму, динаміка якого описується рівняннями:

$$L \frac{di}{dt} = U - i \cdot R - k\Phi \cdot \omega; \quad (6.7)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = k\Phi \cdot i - M_c, \quad (6.8)$$

цю систему можемо записати у вигляді:

$$X = \begin{pmatrix} i \\ \omega \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \end{pmatrix}; U = \begin{pmatrix} U \\ -M_c \end{pmatrix}. \quad (6.9)$$

Шукана матриця A має вигляд:

$$A = \begin{vmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k\Phi}{L} \\ \frac{k\Phi}{J} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}. \quad (6.10)$$

На рис. 6.1 наведений приблизний вигляд діаграм перехідного процесу пуску електроприводу за системою ТП-Д, за якими складається табл. 6.2, що є подібною до табл. 6.1.

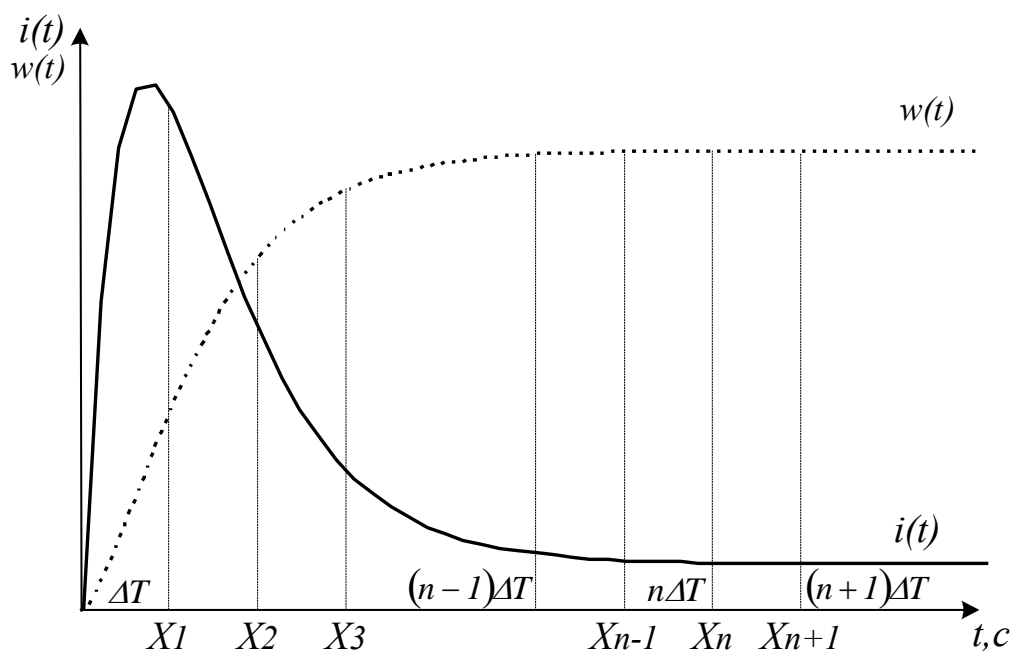


Рисунок 6.1 – Часові діаграми перехідних процесів електроприводу постійного струму

Визначають елементи матриці A , для чого розраховують коефіцієнти зворотної матриці Q^{-1} :

$$q_{11}^{-1} = \frac{q_{22}}{\det Q}; \quad q_{22}^{-1} = \frac{q_{11}}{\det Q}; \quad q_{12}^{-1} = -\frac{q_{12}}{\det Q}; \quad q_{21}^{-1} = -\frac{q_{21}}{\det Q}. \quad (6.11)$$

Таблиця 6.2 – Формування матриці простору станів електроприводу постійного струму

Часовий інтервал t	0	ΔT	$2\Delta T$...	$n\Delta T$
Координати струму i	0	I_1	I_2	...	I_n
Координати швидкості ω	0	ω_1	ω_2	...	ω_n
Номери стовпців матриць R і Q	–	1	2	...	n
$Q = \begin{vmatrix} i_{n+1} - i_{n-1} \\ \omega_{n+1} - \omega_{n-1} \end{vmatrix}$	–	Q_1	Q_2	...	Q_n
$R = \begin{vmatrix} (i_{n+1} - i_n) - (i_n - i_{n-1}) \\ (\omega_{n+1} - \omega_n) - (\omega_n - \omega_{n-1}) \end{vmatrix}$	–	R_1	R_2	...	R_n

Оскільки опір R і коефіцієнт потоку $k\Phi$ можуть бути знайдені за номінальними параметрами двигуна, то шукані динамічні параметри розраховуємо, використовуючи позначення матриці:

$$L = -\frac{R}{a_{11}}; J = \frac{k\Phi}{a_{21}}. \quad (6.12)$$

Визначивши динамічні параметри, можна отримати розрахункові залежності для струму та кутової швидкості електроприводу.

Для цього з рівняння $\det(\lambda \cdot A - E) = 0$, де E – одинична матриця, визначаємо корні характеристичного рівняння λ_1 і λ_2 .

Отримаємо:

$$i(t) = \frac{k\Phi \cdot \omega}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot L} (e^{\lambda_1 t} - e^{\lambda_2 t}) + i_c; \quad (6.13)$$

$$\omega(t) = \omega_c \left(1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{\lambda_2 t} \right). \quad (6.14)$$

$$\begin{cases} U = L \frac{di_k}{dt} + i_k \cdot R + k\Phi \cdot \omega_k \\ U = L \frac{di_{k+1}}{dt} + i_{k+1} \cdot R + k\Phi \cdot \omega_{k+1} \\ U = L \frac{di_{k+2}}{dt} + i_{k+2} \cdot R + k\Phi \cdot \omega_{k+2} \end{cases} \quad (6.17)$$

Розв'язуючи систему (6.17) стосовно шуканих параметрів, отримаємо їх числові значення.

Значну складність викликає обчислення похідних, розрахунок яких можна виконати за однією з наведених формул:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y_{k-1} - y_{k+1}}{2\Delta t}; \quad (6.18)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{-y_{k+2} + 8y_{k+1} - 8y_{k-1} + y_{k-2}}{12\Delta t}; \quad (6.19)$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{y_{k+3} - 9y_{k+2} + 45y_{k+1} - 45y_{k-1} + 9y_{k-2} - y_{k-3}}{60\Delta t}. \quad (6.20)$$

Для визначення параметрів механічної частини користуються другим рівнянням системи (6.16), причому момент опору неробочого ходу запишемо у вигляді:

$$M_c = M_0 + k \cdot \omega^2, \quad (6.21)$$

де M_0 – момент зрушення; k – коефіцієнт вентиляторної характеристики.

Для визначення невідомих параметрів запишемо рівняння для чотирьох інтервалів вимірювань систему рівнянь з урахуванням виразу (6.21):

$$\left\{ \begin{array}{l} J \frac{d\omega_k}{dt} - k\Phi \cdot i_k + M_0 + k \cdot \omega_k^2 = 0 \\ J \frac{d\omega_{k+1}}{dt} - k\Phi \cdot i_{k+1} + M_0 + k \cdot \omega_{k+1}^2 = 0 \\ J \frac{d\omega_{k+2}}{dt} - k\Phi \cdot i_{k+2} + M_0 + k \cdot \omega_{k+2}^2 = 0 \\ J \frac{d\omega_{k+3}}{dt} - k\Phi \cdot i_{k+3} + M_0 + k \cdot \omega_{k+3}^2 = 0 \end{array} \right. , \quad (6.22)$$

вирішуючи яку, отримаємо необхідні числові значення. Для визначення похідних $\frac{d\omega}{dt}$ за кривою $\omega(t)$ використовуємо вирази чисельного визначення похідних (6.18)–(6.20).

Особливістю реалізації цього методу є те, що інтервал часу між вимірюваннями має бути різним, тобто $\Delta t_k \neq \Delta t_{k+1} \neq \Delta t_{k+2} \neq \Delta t_{k+3}$, тому що похідні в точках, вибраних з малим кроком дискретизації, мало відрізняються одна від одної, що призводить до значних похибок.

Зміст звіту

1. Тема та мета роботи.
2. Стислі теоретичні відомості щодо визначення динамічних параметрів електроприводу постійного струму за пусковими характеристиками.
3. Функціональна схема експериментальної частини.
4. Графіки і залежності за таблицями.
5. Результати розрахунку параметрів і постійних часу у вигляді таблиці.

	T_e	T_m	$J_{об}$	$L_{я}$
Паспортні дані				
Метод простору станів				
Метод інтервалів				

Порівняння отриманих результатів та висновки до них.

Примітка. Графіки залежностей $\omega = f(t)$, $I_{я} = f(t)$, отримані аналітичним шляхом, необхідно зобразити в тому самому масштабі, що й досліджені криві, отримані за допомогою вимірювально-діагностичного комплексу.

Контрольні питання

1. Які параметри приймаються як динамічні, що визначають характер перехідних процесів електроприводу?
2. Основні методи визначення параметрів об'єкта.
3. Сутність методу простору станів.
4. Сутність методу інтервалів.
5. Особливості реалізації розглянутих методів визначення параметрів об'єкта.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Кількість лабораторних занять – 18 годин (6 лабораторних робіт).

Поточний контроль на лабораторних заняттях протягом змістових модулів:

- відвідування лабораторних занять – 0,5 бала за заняття (максимум 3,0 бали з відвідуванням усіх лабораторних занять);
- підготовка до лабораторної роботи – 0,5 бала за лабораторне заняття, передбачене робочою-навчальною програмою навчальної дисципліни (максимум 3,0 бали за семестр);
- наявність лабораторної роботи – 0,5 бала за лабораторну роботу (максимум 3,0 бали за всі лабораторні роботи);
- захист лабораторної роботи – 3,0 бали за лабораторну роботу (максимум 18,0 балів за всі лабораторні роботи);
- якість оформлення звіту з лабораторної роботи – максимум 0,25 бала за звіт з лабораторної роботи (максимум 1,5 бала за всі лабораторні роботи);
- опитування під час проведення лабораторних занять – максимум 0,25 бала за аудиторне заняття (максимум 1,5 бала за семестр).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Родькин Д. И. Системы динамического нагружения и диагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д. И. Родькин. – М. : Недра, 1992. – 236 с.
2. Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальних дисциплін «Математичні методи в обчисленнях на ЕОМ», «Чисельні методи» і «Обчислювальний практикум» для студентів зі спеціальностей: 7.092203 – «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», 7.091502 – «Комп'ютерні системи та мережі» денної форми навчання. – Кременчук, 2000.
3. Родькин Д. И. Оценка информационных признаков мгновенной мощности в элементах электромеханических систем / Д. И. Родькин, А. И. Ломонос // Вісник КДПУ. – 2002. – № 1. – С. 212–215.
4. Ломонос А. И. Закономерности частотных преобразований мощности полигармонических сигналов / А. И. Ломонос, А. В. Бялобржеський, С. А. Кривонос // Вісник КДПУ. – 2002. – № 2. – С. 102–106.
5. Родькин Д. И. Оценка мгновенной мощности в задачах диагностики электромеханических систем / Д. И. Родькин, А. И. Ломонос, А. В. Бялобржеський, Д. В. Барвинок // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск Збірник наукових праць «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика». – Харків : НТУ «ХПІ», 2003. – № 10. – Т. 1. – С. 261–266.
6. Чорний О. П. Моделирование электромеханических систем / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Д. Й. Родькін, Г. Ю. Сисюк, О. В Садовой. – Кременчук, 2001. – 410 с.
7. Котеленец Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высшая школа, 1988. – 232 с.
8. Ермолин Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 247 с.
9. Кузнецов Н. Л. Модели надежности узлов электрических машин / Н. Л. Кузнецов. – М. : МЭИ, 1982. – 86 с.
10. Качество и надежность асинхронных двигателей / О. Д. Гольдберг. – М. : Энергия, 1968. – 173 с.

Таблиця А.1 – Технічні дані ДПС серії 2П

P_H , кВт	U_H , В	n , об/хв		η_H , %	Опір обмотки при 15 ⁰ С, Ом		$L_{Я.К.}$, мГн
		n_H	n_{max}		якоря	додаткових полюсів	
1.0	220	3000	4000	72.5	2.52	1.47	48
0.53	220	2240	4000	73	4.26	2.84	108
0.37	220	750	1500	59.5	11.78	6.7	343
2.0	220	3000	4000	79	0.805	0.57	26
1.1	110	1500	4000	72.5	0.52	0.51	21
0.6	220	1600	3000	72.5	4.38	2.62	150
0.85	110	1060	4000	63	0.788	0.682	9.3
3.6	110	3150	4000	78.5	0.084	0.089	1.0
1.25	110	1060	4000	68.5	0.517	0.444	7.2
3.4	220	2200	4000	78	0.413	0.411	6.2
5.3	110	3350	4000	79.5	0.46	0.051	1.5
2.0	220	3150	4000	81	0.413	0.411	7.1
2.5	110	1000	4000	72	0.271	0.204	5.7
7.0	440	2240	4000	83	0.906	0.692	18

Продовження таблиці А.1

10.5	440	3000	4000	85	0.564	0.336	11
P_H , кВт	U_H , В	n , об/хв		η_H , %	Опір обмотки при 15 ⁰ С, Ом		$L_{я.к.}$, мГн
		n_H	n_{max}		якоря	додаткових полюсів	
5.5	110	1500	4000	80	0.08	0.066	1.8
8.5	440	2240	4000	84.5	0.67	0.445	14
14	220	3150	4000	86	0.08	0.066	1.8
1.6	110	1060	4000	71	0.346	0.224	7.9
2.4	440	1600	3750	76.5	2.85	1.64	62
4.5	220	3150	4000	81.5	0.185	0.148	4.2
15	440	1500	3500	86	0.338	0.221	11
37	220	3000	3500	89.5	0.022	0.015	0.68
1.3	110	800	3000	65.5	0.472	0.308	11
2.8	220	1500	4000	76.5	0.601	0.454	15
4.2	440	1000	2500	73	2.8	1.96	55
7.5	110	2200	4000	83	0.055	0.039	1.1
11	220	3000	4000	85.5	0.08	0.066	1.8
7.1	440	750	1800	82.5	1.06	0.67	36
42	440	3000	3500	90.5	0.065	0.044	2.2

ОПИС ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА № 1

Виходячи із завдань, що ставляться під час виконання лабораторної роботи, синтезується функціональна схема лабораторного стенда, що зображена на рис. Б.1. Стенд отримує живлення від лабораторної мережі перемінного струму напругою 220 В з нульовим проводом. До складу стенда входять дві електричні машини постійного струму $M1$ і Mz .

Машина постійного струму $M1$ ($P_n = 1,4 \text{ кВт}$; $U_n = 220 \text{ В}$; $n_n = 1500 \text{ об/хв}$; $\eta = 91 \%$; $R_{\text{я}} = 2,7 \text{ Ом}$; $L_{\text{я}} = 94 \text{ мГн}$; $I_{\text{я}} = 8,7 \text{ А}$; $R_{\text{доб}} = 0,081 \text{ Ом}$; $R_{\text{оз}} = 314 \text{ Ом}$; $L_{\text{оз}} = 32,8 \text{ Гн}$; $J = 0,021 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$) підключена як ірним колом до керованого перетворювача TPI . У силовому ланцюзі TPI здійснюється безпосередній контроль напруги і струму (прилади $PV1$ і $PA1$ відповідно), а також автоматичний контроль за допомогою датчиків струму і напруги ($ДС1$ і $ДН1$). Можливі режими роботи перетворювача TPI :

- на активне навантаження – підключення R_H пускачем $K1$ ($SB1$ у положенні Rd);
- на навантаження з протиЕРС – підключення $M1$ пускачем $K1$ ($SB1$ у положенні Mz).

Тиристорний перетворювач TPI гальванічно розв'язаний з мережею живлення через трифазний трансформатор $TV1$, підключення якого до мережі здійснюється автоматичним вимикачем $QF1$, максимальний струм ланцюга обмежується автоматичним вимикачем $QF2$.

Ланцюг збудження машини $M1$ одержує живлення від однофазного тиристорного перетворювача $TPI2$. У силовому ланцюзі $TPI2$ здійснюється безпосередній контроль струму і напруги (прилади $PA2$ і $PV2$ відповідно), а також автоматичний контроль за допомогою датчиків напруги і струму ($ДН2$ і $ДС2$). Ланцюг перетворювача захищений від перевантаження автоматичним вимикачем $QF6$. Живлення перетворювача $TPI2$ здійснюється від однофазного трансформатора $TV3$, що підключений безпосередньо до живильної мережі

стенда. Захист вторинної обмотки трансформатора здійснюється автоматичним вимикачем і запобіжниками, що входять до комплексу перетворювача ТП2.

Машина $M1$ жорстко зв'язана з тахогенератором BR , що за допомогою датчика швидкості $ДШ1$ дозволяє контролювати швидкість обертання машини.

Якірний ланцюг і обмотка збудження машини Mz ($P_n = 9 \text{ кВт}$; $U_n = 220 \text{ В}$; $n_n = 3000 \text{ об/хв}$; $I_a = 39,4 \text{ А}$; $\eta_n = 91 \%$; $U_z = 110 \text{ В}$; $I_z = 0,68 \text{ А}$) підключаються аналогічно. Переключенням SBI у положення виконується підключення машини Mz до мережі живлення та приладів контролю.

Керування стендом здійснюється кнопками і тумблерами, розташованими на панелі керування стендом. Не виключене застосування дистанційного керування деякими перетворювальними пристроями. Сигнали, вимірювані датчиками, обробляються за визначеними алгоритмами і надходять на вхідні пристрої електронної обчислювальної машини (ЕОМ), що здійснює функції контролю, і формування керуючих впливів.

ОПИС ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА № 2

Комплектний електропривод складається з тиристорного перетворювача типу «*КЕМРОН*» і високомоментного двигуна постійного струму типу *4МХ-1* з вбудованим тахогенератором, безконтактним резольвером типу *РБ-2*, безлюфтовим електромагнітним гальмом і позистором.

Окрім тиристорного перетворювача і двигуна, до основних елементів, що входять до лабораторного стенда, також належить таке устаткування: попередній трансформатор 220/380 В, силовий трансформатор типу *ТІЕВ-20Р-Д*-380/6×275*, зрівняльні дроселі типу *РУ-15850* і швидкодіючі силові запобіжники.

Функціональна схема стенда (рис. В.1) з перетворювачем, використовуваним у даному лабораторному стенді, виконана за реверсивною шестипульсною однонапівперіодною схемою випрямлення зі зрівняльними дроселями. Така схема забезпечує високу смугу пропускання приводу (до 40 Гц) і забезпечує високі динамічні властивості, що виправдовує його підвищену вартість.

Силовий трансформатор здійснює узгодження напруги електродвигуна з напругою мережі живлення. Обмотки трансформатора включені за схемою «трикутник–подвійний зигзаг», чим досягається виключення потоку змушеного намагнічування і, як наслідок, економія сталі.

Електропривод містить у собі силові трансформатори; тиристорний перетворювач; блок запобіжників; зрівняльні дроселі.

Основною перевагою *ДПС*, що визначає їхнє широке застосування у верстатних регульованих і приводах, що стежать, є висока лінійність механічних характеристик, що дозволяє плавно регулювати частоту обертання вала двигуна в дуже широких межах (діапазон регулювання частоти обертання сучасних *ДПС* складає 10000 і більше).

Тиристорний перетворювач «КЕМРОН» виконаний за двоконтурною схемою підпорядкованого регулювання з регуляторами швидкості та струму. Керування перетворювачем – узгоджене нелінійне на низьких швидкостях (більше 300 об/хв). Передбачено можливість адаптивного керування коефіцієнтами підсилення контуру швидкості на низьких швидкостях.

Комутаційна апаратура, застосовувана у стенді, призначена для здійснення процедур комутації силових ланцюгів і ланцюгів керування. Автоматичний вимикач *QF1* здійснює підключення ланцюгів стенда до лабораторної мережі, цей самий автоматичний вимикач виконує захист силових ланцюгів стенда. Керування пуском і гальмуванням приводного двигуна електромеханічного перетворювача здійснюється кнопками керування *SA1*, *SA2*, що включені в ланцюг керування силовим пускачем *KL1*, силові контакти якого комутують ланцюг фаз попереднього підвищувального трансформатора. Подача сигналу готовності тиристорного перетворювача здійснюється за допомогою тумблера *SB1*. Завдання напрямку обертання вала *ДПС* і його реверсування здійснюється шляхом переключення тумблера *R*. Включення електромагнітного гальма виробляється шляхом переведення тумблера *SB3* у положення «Вкл». Регулювання напруги живлення виконується за допомогою *ЛАТРу*.

Вимірювальні пристрої, включені до складу стенда, призначені для контролю параметрів *ДПС*, *ТП*, а також параметрів мережі живлення. Напруга тахогенератора *ДПС* контролюється приладом *PV4*, контроль напруги керування кута відкриття силових тиристорів здійснюється приладом *PV5*. Струм якоря визначається за допомогою амперметра *PA2*. Для контролю параметрів мережі живлення (струму і напруги) використовуються амперметр *PA1* і вольтметр *PV1* відповідно. Як навантаження на валу двигуна використовується пристрій електромагнітного гальма, контроль напруги якого забезпечується приладом *PV6*. У стенді передбачений також контроль величини напруги однієї з фаз вторинної обмотки силового трансформатора за допомогою приладу *PV2*.

Керування стендом здійснюється кнопками і тумблерами, розташованими на панелі керування стендом. Не виключене застосування дистанційного керування деякими перетворювальними пристроями. Сигнали, вимірювані датчиками, обробляються за визначеними алгоритмами і надходять на вхідні пристрої електронної обчислювальної машини (ЕОМ), що здійснює функції контролю, і формування керуючих впливів.

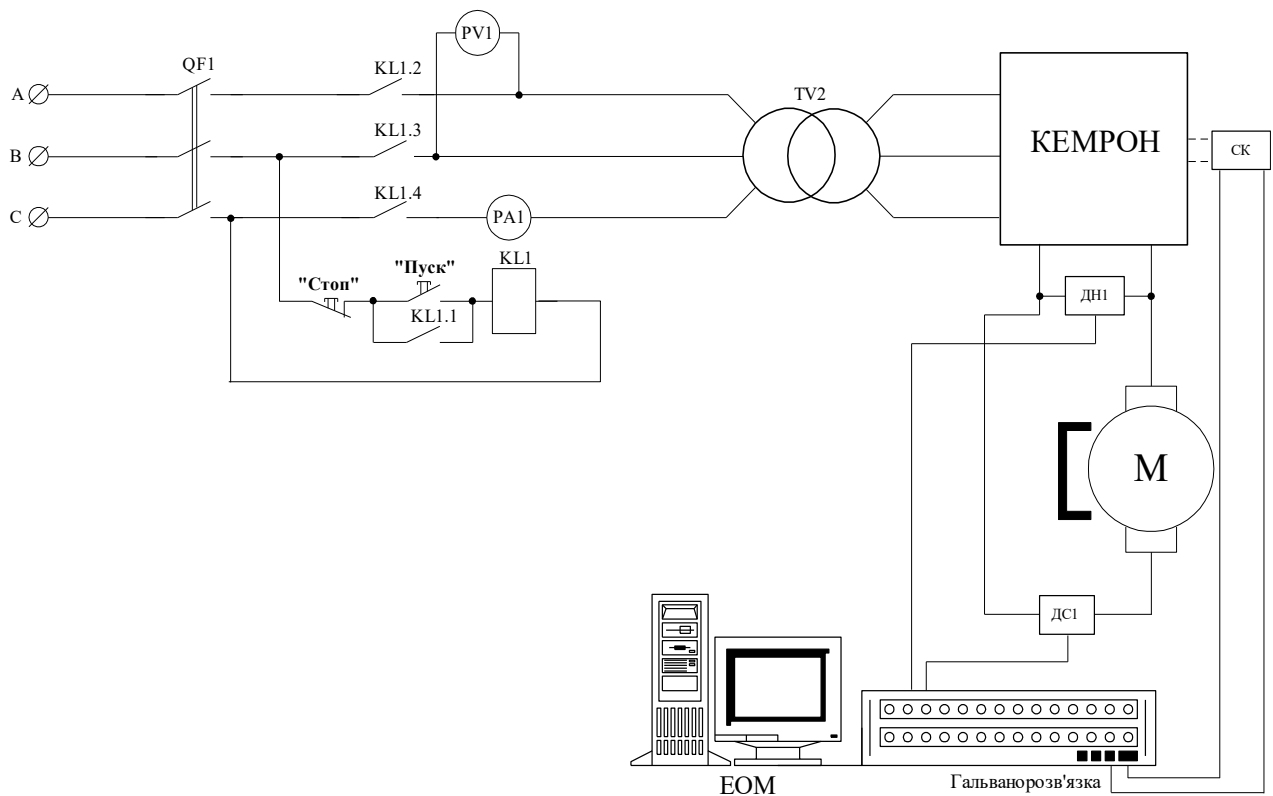


Рис. В.1 – Функціональна схема досліджувальної установки лабораторного стенда № 2

РОЗКЛАДАННЯ ПОЛІГАРМОНІЧНОГО СИГНАЛУ В РЯД ФУР'Є

Розкладання полігармонічного сигналу в ряд Фур'є виконується відповідно до наведеної нижче програми, виконаної у математичному пакеті *MathCAD*.

1. Спочатку необхідно задати функцію зчитування масиву значень, отриманих під час проведення досліду: $M:=READPRN("c:\Din4_1.txt");$ присвоюємо відповідні стовпці заданої матриці досліджуваним параметрам $a1:=M^{<1>}$ та $a6:=M^{<6>}$; задається інтервал зміни сигналів $n:=1..N$, де N – значення останньої точки вимірювання, тоді час, протягом якого проводиться вимірювання сигналів $t_n:=n/9000$. Після цього будуються експериментальні залежності напруги та струму якоря (рис. Г.1).

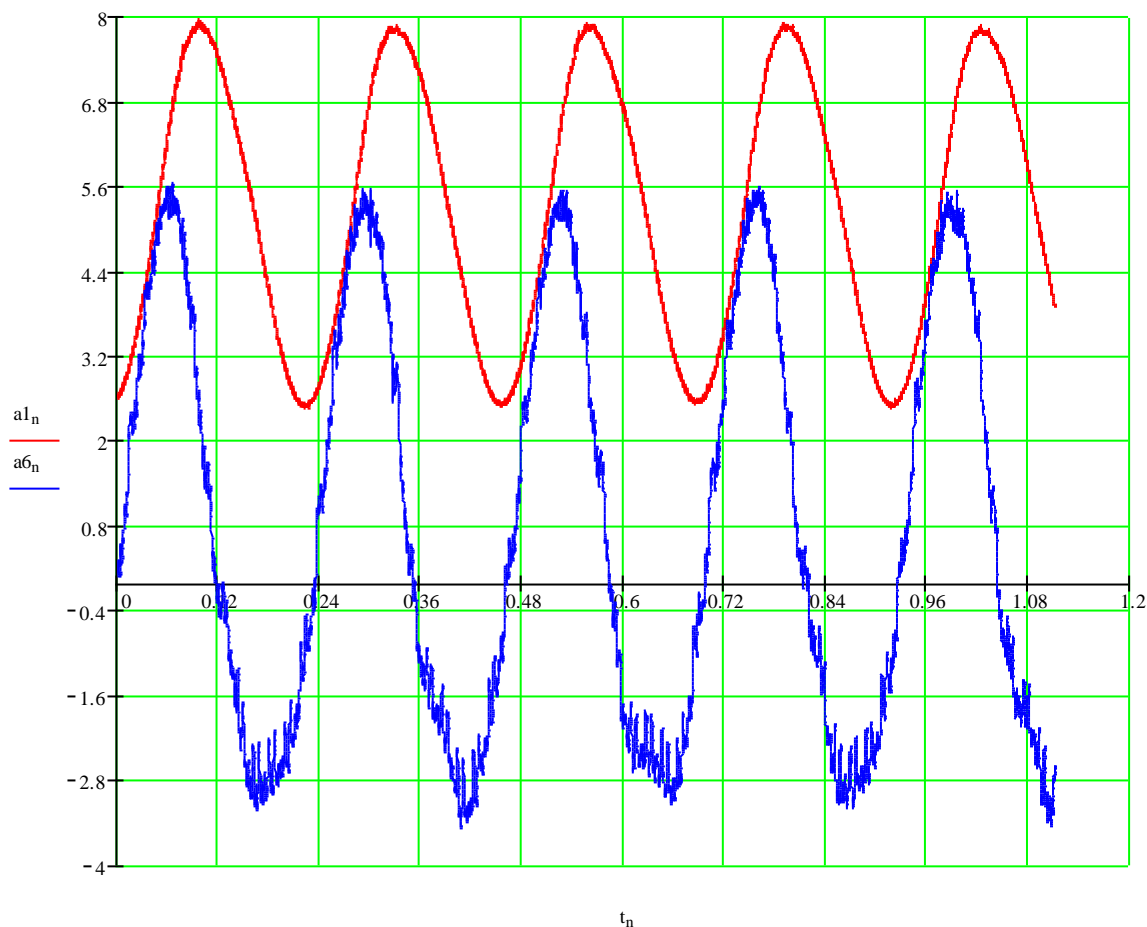


Рис. Г.1 – Експериментальні залежності напруги та струму якоря

2. Для більш достовірного розкладання сигналу струму в ряд Фур'є необхідно провести його згладжування: $abs:=supsmooth(M^{<0>}, M^{<6>})$, потім присвоюємо згладжений сигнал змінній величині $b:=abs$ і будуємо відповідну залежність згладженого сигналу від часу.

3. За отриманими графіками визначається період зміни досліджуваних сигналів T (з точністю до трьох знаків після коми) і визначається частота впливу $f:=1/T$. Задаємо кількість точок дискретизації $n:=T/(t_2-t_1)$, інтервал зміни сигналу $i:=0..n$ та додатковий час $t_{1i}=t_i$, де t_2 та t_1 – відповідно друге та перше значення точок вимірювання матриці M .

4. Присвоюємо отримані сигнали напруги та струму відповідним змінним параметрам: $Uya_i:=aI_i$, $Iya_i:=b_i$; $Uya1:=Uya_i$, $Iya1:=Iya_i$. Потім проводимо лінійну інтерполяцію (математично описуємо) експериментальні криві напруги та струму: $Uya(t):=linterp(t1,Uya1,t)$; $Iya(t):=linterp(t1,Iya1,t)$, присвоюємо їх параметрам $Uya1(t):=Uya(t)$, $Iya1(t):=Iya(t)$ та задаємо часовий інтервал $t:=t1$, після чого будуємо отримані характеристики (рис. Г.2).

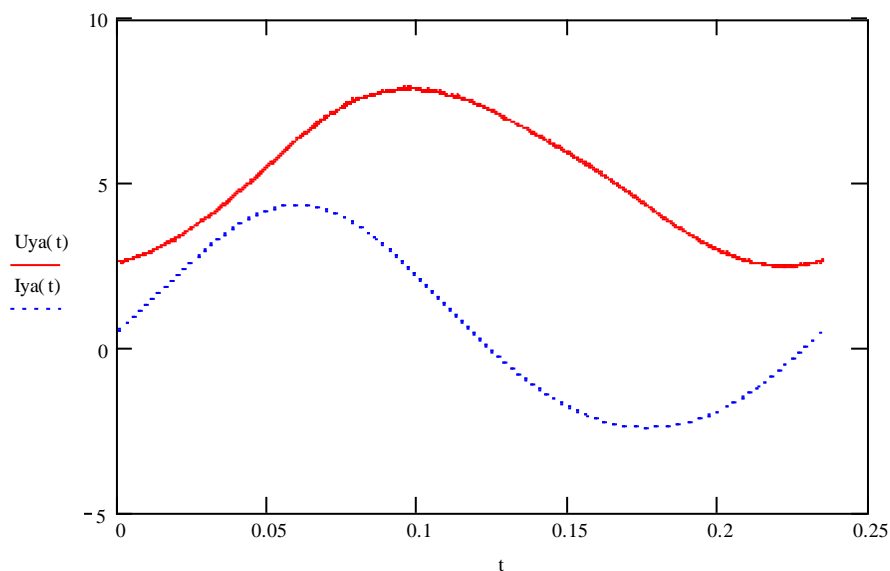


Рис. Г.2 – Вигляд експериментальних кривих після лінійної інтерполяції

5. Задаємо необхідні для розкладання в ряд Фур'є параметри: необхідну частоту квантування $F:=1000$; частоту зміни сигналу $f:=1/T$; кількість точок дискретизації $n:=F \cdot T$; довільну кількість гармонік $M:=30$; період квантування $dt:=1/F$; інтервал зміни коефіцієнтів розкладу $i:=0,1..n-1$.

6. Переводимо сигнали, що залежать від часу, до сигналів, що залежать від початкового масиву значень: $Uya_i := Uya(i \cdot dt)$, $Iya_i := Iya(i \cdot dt)$. Надалі задаємо крок квантування $p := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot dt$ і послідовність зміни гармонік $k := 1..M$.

7. Визначаємо коефіцієнти розподілу Фур'є:

$$\text{постійні складові: } Au_0 := \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} Uya_i; Ai_0 := \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} Iya_i;$$

косинусні складові:

$$Au_k := \left(\frac{2}{n}\right) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} Uya_i \cdot \cos(k \cdot i \cdot p); Ai_k := \left(\frac{2}{n}\right) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} Iya_i \cdot \cos(k \cdot i \cdot p);$$

синусні складові:

$$Bu_k := \left(\frac{2}{n}\right) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} Uya_i \cdot \sin(k \cdot i \cdot p); Bi_k := \left(\frac{2}{n}\right) \cdot \sum_{i=0}^{n-1} Iya_i \cdot \sin(k \cdot i \cdot p).$$

8. Розраховуємо амплітуди та фазові кути зсуву для обох сигналів:

$$Mu_k := |Au_k + iBu_k|; Mi_k := |Ai_k + iBi_k|; Mu_0 := Au_0; Mi_0 := Ai_0;$$

$$\psi u_k := \arg(Bu_k + i \cdot Au_k); \psi i_k := \arg(Bi_k + i \cdot Ai_k).$$

При цьому спектрограми амплітуди та фазового кута зсуву матимуть приблизний вигляд, що наведений на рис. Г.3.

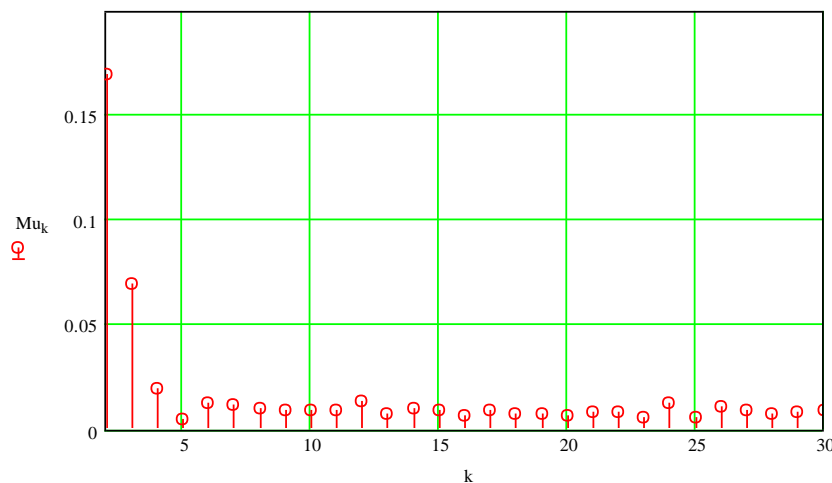


Рис. Г.3 – Приблизний вигляд спектрограм амплітуди та фазового кута зсуву

9. Необхідно відновити початкові сигнали напруги та струму:

$$U_{ya1}(t) := Mu_0 + \sum_{k=1}^{30} Mu_k \cdot \sin(\Omega_k \cdot t + \psi u_k);$$

$$I_{ya1}(t) := Mi_0 + \sum_{k=1}^{30} Mi_k \cdot \sin(\Omega_k \cdot t + \psi i_k),$$

де $\Omega_k := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot k$; $t := 0, 0.001 \dots \frac{1}{f}$.

10. Порівнюємо початкові сигнали з відновленими (рис. Г.4).

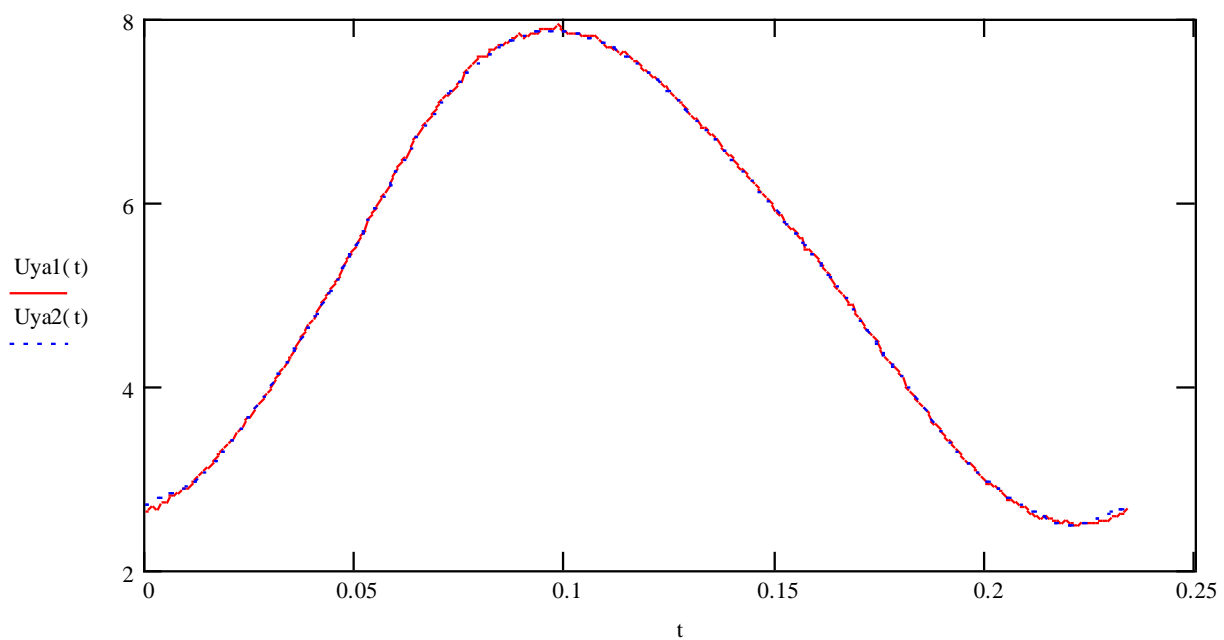


Рис. Г.4 – Результат порівняння первісного сигналу напруги з відновленим

Зразок оформлення титульної сторінки

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

КАФЕДРА СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ
ТА ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Звіт

до лабораторного заняття з навчальної дисципліни
«Загальні питання надійності електрообладнання»

Виконав

студент групи _____

Перевірив

Кременчук 20__

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Загальні питання надійності електрообладнання» для студентів денної та заочної форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (у тому числі скорочений термін навчання)

Укладачі: к. т. н., доц. С. В. Сукач,
старш. викл. Д. В. Рєзнік,
асист. М. А. Руденко

Відповідальний за випуск зав. кафедри САУЕ Д. Й. Родькін

Підп. до др. _____. Формат 60×84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам № _____. Безкоштовно.

Видавничий відділ Кременчуцького національного університету імені Михайла

Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600