МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ" КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання комп'ютерних практикумів для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр" напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка"

Рекомендовано Вченою Радою факультету електроенерготехніки та автоматики НТУУ "КПІ"

Київ НТУУ «КПІ» 2015

УДК 681.3.06

Методичні вказівки до виконання комп'ютерних практикумів з дисципліни "Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії" для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр" напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка"/ Уклад.: Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін. – К.: НТУУ "КПІ", 2015. – 70 с.

> Рекомендовано Вченою Радою факультету електроенерготехніки та автоматики НТУУ "КПІ" (Протокол №_ від __.__ р.)

Навчальне видання

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання комп'ютерних практикумів для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр" напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка"

Укладачі: Васьковський Юрій Миколайович, докт. техн. наук, проф. Гераскін Олександр Анатолійович, канд. техн. наук.

Відповідальний

редактор Коваленко М.А., канд. техн. наук

Рецензент Островерхов М.Я., докт. техн. наук, проф.

© НТУУ "КПІ", 2015 © Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін, 2015

3MICT

Передмова	5
Комп'ютерний практикум №1. Математичне моделювання та дослідже	ння
пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором	5
Частина 1 Дослідження впливу параметрів короткозамкненого асиня	крон-
ного двигуна на пускові характеристики	5
Частина 2 Математичне моделювання та дослідження пуску асинхро	онного
двигуна з короткозамкненим ротором при несиметричній напрузі жи	влен-
ня в програмі MatLab – Simulink	13
Комп'ютерний практикум №2. Математичне моделювання та дослідже	ння
перехідних процесів в синхронному генераторі	22
Частина 1 Математичне моделювання та дослідження раптового кор	откого
замикання синхронного генератора	22
Частина 2 Математичне моделювання та дослідження протифазного	вми-
кання синхронного генератора в електромережу	25
Комп'ютерний практикум №3. Математичне моделювання електромаг	нітних
полів в електромеханічних перетворювачах енергії в програмі Comsol Mu	ιl-
tiphysics	25
Частина 1 Математичне моделювання електромагнітного поля си	ілового
трансформатора	25
Частина 2 Математичне моделювання електромагнітного поля корот	гкоза-
мкненого асинхронного двигуна	25
Перелік рекомендованої літератури	25
Додаток	25

ПЕРЕДМОВА

Представлені методичні вказівки призначені для використання студентами освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр" напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка" при проведенні комп'ютерних практикумів з дисципліни *Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії*.

Виконання комп'ютерного практикуму дозволяє розвинути і закріпити у студентів навички досліджень складних динамічних процесів в електричних машинах на основі методів математичного моделювання з використанням сучасних програмних засобів. Зокрема головна увага приділяється математичному моделювання перехідних процесів в найбільш поширених електричних машинах – асинхронних двигунах і синхронних генераторах. При моделюванні студенти використовують, як оригінальне програмне забезпечення, розроблене на кафедрі електромеханіки НТУУ "КПІ", так і добре відомі програмнообчислювальні комплекси MatLab – Simulink, Comsol Multiphysics.

Згідно з навчальними планами ОКР "бакалавр" напряму підготовки 6.050702 "Електромеханіка" на комп'ютерний практикум з дисципліни "Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії" виділяється 18 годин аудиторних занять. Практикум складається з трьох окремих тематичних завдань. Тематика завдань по комп'ютерному практикуму та розподілення аудиторних годин є наступними:

1. Математичне моделювання та дослідження пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором (4 години).

2. Математичне моделювання та дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі (4 години).

3. Математичне моделювання електромагнітних полів в електромеханічних перетворювачах енергії в програмі Comsol Multiphysics (8 годин).

4. Захист отриманих студентом результатів компьютерних практикумів (2 години).

Результати математичного моделювання та дослідження впливу різних параметрів та факторів на пускові характеристики асинхронного двигуна (тематика компьютерного практикуму №1) узагальнюються студентами та оформлюються у вигляді розрахунково-графічної роботи.

При підготовці, виконанні та аналізі результатів комп'ютерних практикумів рекомендується використовувати навчальну літературу, список якої наведено в кінці даних методичних вказівок.

Перелік інформації, що необхідно представити в протоколах, наведено в додатку.

Комп'ютерний практикум №1

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Частина 1

Дослідження впливу параметрів короткозамкненого асинхронного двигуна на пускові характеристики

(2 години)

Мета роботи. Дослідження впливу параметрів короткозамкненого асинхронного двигуна (АД) на величини ударного струму і ударного електромагнітного моменту при прямому пуску двигуна від електромережі.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Отримати варіант вхідних даних АД, що досліджується, та виконати моделювання його пуску по програмі EMSDU при зазначених номінальних даних:

2. Виконати серії розрахунків та дослідити величини ударного струму $I_{y\partial}^*$ і ударного моменту $M_{y\partial}^*$ при варіації наступних даних: R_1 , $X_{1\sigma}$, R_2 , $X_{2\sigma}$, X_m , n_H , φ_0 .

3. Навести порівняння розподілів графіків $I_{y\partial}^*$ і $M_{y\partial}^*$ і швидкості ротора від часу для АД з номінальними параметрами в різних системах координат: α , β ; u, v.

4. Проаналізувати результати проведених досліджень.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Ударним струмом $I_{y\partial}^*$ називається максимальне (амплітудне) значення струму обмотки статора АД під час перехідного процесу (у даному випадку – пуску).

Ударним моментом M^*_{yo} називається максимальне (амплітудне) значення електромагнітного моменту АД під час перехідного процесу (у даному випадку - пуску).

На рис.1 зображено розрахункові залежності струму, моменту і швидкості ротора від часу при пуску. Аналіз перехідного процесу проводиться в системі відносних одиниць, в якій всі величини позначені верхнім індексом (*).



Час процесу вимірюється в радіанах. При цьому при частоті 50 Гц одна секунда часу відповідає 314,16 рад. Теоретичні відомості щодо пуску АД дано в літературі [1, 4, 6, 7].

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

При виконанні роботи використовується розроблена на кафедрі електромеханіки НТУУ "КПІ" комп'ютерна програма EMSDU, робоча панель якої зображена на рис.2.



Рис.2 – Програма "EMSDU"

Структура вхідних даних в програмі EMSDU є наступною.

- 1. Блок даних щодо параметрів АД:
 - активний опір обмотки статора R_1^* , в.о.
 - індуктивний опір розсіювання обмотки статора $X_{1\sigma}^{*}$, в.о.;
 - активний опір обмотки ротора (приведений) R_2^{*} , в.о.;
 - індуктивний опір розсіювання обмотки ротора (приведений) $X^*_{2\sigma}$, в.о.;
 - індуктивний опір взаємоіндукції X_m^* , в.о.;
 - інерційна стала агрегату *H*_{*j*};
 - початкова фаза напруги мережі живлення $arphi_0$, рад.
- 2. Блок даних зовнішнього збурення:

- початок дії збурення T_1 , рад;
- кінець дії збурення T_2 , рад;
- зовнішній момент опору M_c , Н·м.
- 3. Блок даних з параметрами розрахункового процесу:
 - вибір системи координат, в якій розглядається перехідний процес.
 Для аналізу пуску АД рекомендується обрати статорну систему координат А, В;
 - інтервал часу, в якому розглядається процес T_{\max} . Для аналізу процесу пуску без проміжних зовнішніх збурень необхідно задати $T_1 > T_{\max}$.
- 4. Параметри організації виводу розрахункової інформації:
 - задається ім'я файлу, в який буде записуватися інформація.
- 5. Паспортні дані машини і початкова швидкість:
 - номінальні потужність, напруга (лінійна) і швидкість;
 - початкова швидкість ротора.
- 6. Чисельні параметри розрахункового процесу:
 - крок розрахунку у часі;
 - крок виводу інформації на друк.

<u>Зауваження</u>: Окрім процесу пуску АД програма EMSDU дозволяє змоделювати комбінований процес, який складається з трьох етапів: вмикання АД в мережу і початок процесу його пуску; відмикання двигуна від мережі в момент часу T_1 ; повторне вмикання АД в мережу в момент часу T_2 . У разі, якщо на інтервалі часу T_{max} потрібно змоделювати тільки процес пуску в програмі задається $T_1 > T_{\text{max}}$.

Програма EMSDU реалізує математичну модель АД, яка ґрунтується на Т – подібній схемі заміщення АД [1, 4, 10]. Для чисельного розв'язання системи диференційних рівнянь використовується метод Рунге-Кутта 4–го порядку з постійним кроком інтегрування.

Перелік інформації, яку необхідно представити в протоколі до **Комп'ютерного практикуму №1** наведено в Додатку.

Особливості процесу виконання комп'ютерного практикуму:

1. Отримати варіант вхідних даних АД, що досліджується, та виконати моделювання його пуску по програмі EMSDU при зазначених номінальних даних:

• Зовнішній момент опору M_c прийняти згідно варіанту і залишати незмінним при наступних дослідженнях. • Величину інерційної сталої агрегату *H*_{*j*} прийняти згідно варіанту і залишати незмінною при наступних дослідженнях.

• При моделюванні для всіх варіантів прийняти номінальну напругу обмотки статора згідно варіанту.

• Роздрукувати отримані розрахункові осцилограми пуску АД для їх включення в звіт (рис.1).

2. Виконати серії розрахунків та дослідити величини ударного струму $I_{y\partial}^*$ і ударного моменту $M_{y\partial}^*$ при варіації наступних даних:

- величини активного опору обмотки статора (від 0,2**R*₁ до 3**R*₁), наприклад, (0,2; 0,5; 0,8; 1,1; 1,4; 1,7; 2,0; 2,3; 2,6; 3)**R*₁;
- величини індуктивного опору обмотки статора (від 0,2**X*₁, до 3**X*₁);
- величини активного опору обмотки ротора (від 0,2**R*₂ до 3**R*₂);
- величини індуктивного опору обмотки ротора (від 0,2**X*₂, до 3**X*₂);
- величини індуктивного опору взаємоіндукції (від 0,2**X*_m до 3**X*_m);
- величини початкової швидкості обертання ротора (від -2,5**n*_{*H*} до 2,5**n*_{*H*});
- величини початкової фази напруги мережі φ₀ (від -3,14 рад до +3,14 рад).
 Варіації параметрів АД виконуються наступним чином. Варіюється пер-

ший із зазначених параметрів, наприклад, активний опір обмотки статора, при незмінних інших, які дорівнюють номінальним значенням. В другій серії розрахунків першому і всім іншим параметрам (окрім другого) присвоюються номінальні значення, а варіюється другий параметр і т. д. При варіації кожного з параметрів виконується 8 ... 10 розрахунків процесу пуску.

За допомогою програми Excel побудувати попарно на одному рисунку графічні залежності величин ударного струму $I_{y\partial}^*$ і ударного моменту $M_{y\partial}^*$ від параметру, значення якого варіювалося (всього будується 7 графіків). Навести таблиці, на основі яких ці графіки побудовані. Особливу увагу приділити дослідженню залежностей $I_{y\partial}^*$ і $M_{y\partial}^*$ від активного опору обмотки ротора і від початкової швидкості АД, які мають суттєві особливості. Зокрема, діапазон початкових швидкостей повинен перевищувати задану синхронну швидкість двигуна.

r_1	0,0006	0,006	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18
Me	5,53	5,3	4	3	2,4	1,88	1,5	1,1
Ι	6,82	6,5	5,9	5,2	4,6	4,18	3,7	3,4

Наприклад, таблиця і графіки можуть бути такими:



3. Навести порівняння розподілів графіків $I_{y\partial}^*$ і $M_{y\partial}^*$ і швидкості ротора від часу для АД з номінальними параметрами в різних системах координат: α , β ; u, v.

4. Проаналізувати результати проведених досліджень і зробити висновки щодо впливу зазначених параметрів на пускові характеристики АД. У висновках по роботі необхідно охарактеризувати отримані результати кількісно і співставити їх з відомими фізичними процесами в асинхронних двигунах.

Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №1. В таблиці 1 наведено дані варіантів АД, що досліджуються.

				1			
No		Пар	раметри а	синхронно	ого двигу	ина	
варіанту	<i>Р2</i> , кВт	<i>п₁,</i> об/хв	<i>X</i> 1σ, В.О.	<i>Х₂σ</i> , в.о.	<i>R</i> ₁ , в.о.	<i>R</i> ₂ , в.о.	<i>Х</i> _m , в.о.
1	3,5	3000	0,0635	0,0584	0,0722	0,0317	2,7
2	5	1500	0,1	0,08	0,055	0,05	2,5
3	1,5	750	0,0866	0,132	0,1321	0,0892	1,7
4	1,1	3000	0,0831	0,0512	0,1058	0,0457	1,5
5	2,2	3000	0,0866	0,08	0,0731	0,0367	3
6	75	1500	0,1	0,12	0,0178	0,0143	4
7	3,5	1000	0,08	0,06	0,056	0,06	2,5
8	5	1000	0,12	0,09	0,075	0,07	2
9	6	750	0,15	0,13	0,09	0,08	1,7
10	2	1500	0,1	0,12	0,05	0,06	2,3
11	4	3000	0,09	0,08	0,0731	0,0367	3
12	35	750	0,15	0,1	0,05	0,05	3
13	25	3000	0,09	0,09	0,02	0,01	3
14	10	1000	0,11	0,08	0,03	0,02	2,5
15	5	3000	0,08	0,1	0,045	0,06	3
16	6	750	0,15	0,13	0,06	0,05	1,9
17	2	1500	0,1	0,12	0,05	0,06	2
18	15	3000	0,09	0,08	0,0731	0,0367	3
19	35	750	0,15	0,1	0,05	0,05	3
20	3,5	1000	0,15	0,08	0,05	0,01	2,5
21	5	1000	0,1	0,1	0,02	0,02	3
22	6	750	0,09	0,09	0,03	0,06	1,9
23	2	1500	0,15	0,08	0,045	0,05	2
24	4	3000	0,09	0,1	0,06	0,06	3
25	35	750	0,11	0,13	0,05	0,0367	3

Таблиця 1 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №1

продовження гаолиці і	Продовження	таблиці 1	_
-----------------------	-------------	-----------	---

A						
Nº		Параметри асинхронного двигуна				
варіанту	H_j	<i>ф₀</i> , рад	<i>Т</i> 1, рад	<i>Т₂</i> , рад	<i>М</i> _с , <i>Н</i> ∙м	<i>U</i> _{лн} , В
1	157	30	250	300	0,15	220
2	225	60	100	125	0,2	380
3	187	45	150	200	0,1	220
4	325	90	125	200	0,15	220
5	126	180	200	225	0,25	220
6	225	270	175	225	0,15	660
7	187	135	100	175	0,2	220
8	325	300	150	175	0,1	380
9	126	60	125	175	0,15	380
10	225	45	100	175	0,25	220
11	187	90	150	175	0,15	220
12	325	180	125	175	0,2	660
13	126	270	200	275	0,1	660
14	225	135	100	125	0,15	380
15	187	300	150	200	0,25	380
16	325	60	125	200	0,15	380
17	126	45	200	225	0,2	220
18	225	90	100	150	0,1	660
19	187	180	150	225	0,15	660
20	325	60	125	150	0,25	220
21	126	45	200	250	0,15	380
22	225	90	100	175	0,2	380
23	187	180	150	175	0,1	220
24	325	270	125	175	0,15	220
25	126	135	200	275	0,25	660

Частина 2

Математичне моделювання та дослідження пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметричній напрузі живлення в програмі MatLab – Simulink

(2 години)

Мета роботи. Дослідження впливу несиметрії напруги живлення на пускові характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в програмі MatLab – Simulink.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Побудувати структурну схему асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в пакеті MatLab – Simulink.

2. Обрати варіант АД (дані варіанту такі ж, як і в комп'ютерному практикумі №1 – таблиця 1).

3. Промоделювати процес пуску асинхронного двигуна с заданими параметрами при симетричній напрузі живлення. Побудувати розрахункові осцилограми (в інтервалі часу 0 ... 3 с) наступних величин:

- струмів фаз обмотки статора *I*₁;
- струмів фаз обмотки ротора *I*₂;
- електромагнітний момент М;
- швидкість обертання ротора *n*;
- напруга мережі *U*.

Зазначені осцилограми використати в звіті по роботі.

4. Провести серію розрахунків (8 … 10 розрахунків) при амплітудній несиметрії напруги живлення шляхом зміни напруги живлення фази В. В кожному розрахунку визначити величини ударного струму $I_{y\partial}^*$, ударного моменту $M_{y\partial}^*$, а також час розгону двигуна t_P до номінальної швидкості. Побудувати графіки зміни $I_{y\partial}^*$, $M_{y\partial}^*$ і t_P від коефіцієнту амплітудної несиметрії k_A .

5. Провести серію розрахунків (8 … 10 розрахунків) при фазовій несиметрії напруги живлення шляхом зміни кута напруги живлення фази В. В кожному розрахунку визначити величини ударного струму I_{yo}^* , ударного моменту M_{yo}^* , а також час розгону двигуна t_P до номінальної швидкості. Побудувати графіки зміни I_{yo}^* , M_{yo}^* і t_P від коефіцієнту фазової несиметрії k_{ϕ} .

6. Провести серію розрахунків (8 … 10 розрахунків) при змішаній несиметрії напруги живлення шляхом одночасної зміни амплітуди і фазового кута напруги живлення фази В. В кожному розрахунку визначити величини ударного струму I_{yo}^* , ударного моменту M_{yo}^* , а також час розгону двигуна t_P до номінальної швидкості. Побудувати графіки зміни I_{yo}^* , M_{yo}^* і t_P від коефіцієнту змішаної несиметрії k_3 .

7. Провести порівняльний аналіз впливу різних видів несиметрії на пускові характеристики двигуна. Написати висновки по роботі.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Пускові характеристики короткозамкненого АД погіршуються у разі несиметрії трифазної напруги, що живить АД. Зокрема збільшується час пуску, спотворюються струми в фазах тощо. Можливі наступні випадки несиметрії прикладеної напруги: 1) *амплітудна несиметрія*, при якій амплітуди напруг різних фаз є неоднаковими по величині; 2) *фазова несиметрія*, при якій фазові кути між напругами різних фаз є неоднаковими; 3) *змішана несиметрія*, при якій присутнє сполучення двох попередніх випадків.

Аналіз впливу амплітудної несиметрії проводиться при умові незмінності напруг в двох фазах обмотки статора АД (наприклад, фаз А і С) і зміні напруги в фазі В від 0 до номінального значення (5-7 точок). При цьому вводиться коефіцієнт амплітудної несиметрії

$$k_A = \frac{U_A - U_B}{U_A}$$

Значення цього коефіцієнту знаходиться в межах $0 \le k_A \le 1$. При відсутності несиметрії ($U_A = U_B$) маємо $k_A = 0$, а при максимальній несиметрії (напруга в одній фазі $U_B = 0$) коефіцієнт амплітудної несиметрії $k_A = 1$.

Аналіз впливу фазної несиметрії проводиться при умові незмінності кутів напруг в двох фазах обмотки статора АД (наприклад, фаз A i C: $\varphi_A = 0, \varphi_C = 240^\circ$) і зміні кута напруги в фазі В в межах $0^\circ \le \varphi_B \le 240^\circ$ (5-7 точок). При цьому вводиться коефіцієнт фазової несиметрії

$$k_{\mathcal{P}} = \frac{\varphi_B - 120}{120}.$$

Значення цього коефіцієнту знаходиться в межах $0 \le k_{\phi} \le 1$. При відсутності фазової несиметрії ($\varphi_B = 120^{\circ}$) маємо $k_{\phi} = 0$, а при максимальній несиметрії (напруги фаз В і С мають однаковий кут $\varphi_B = 240^{\circ}$) коефіцієнт дорівнює $k_{\phi} = 1$.

Для аналізу змішаної несиметрії використовується коефіцієнт

$$k_3 = k_A + k_{\varPhi}$$

Числові значення коефіцієнту змішаної несиметрії також лежить в межах $0 \le k_3 \le 2$. При цьому коефіцієнти мають бути однаковими: $k_A = k_{\Phi}$.

Аналіз впливу несиметрії напруги живлення на пускові характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором проводиться за допомогою математичної моделі, розробленої в пакеті MatLab – Simulink.

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

1. Завантажити на комп'ютері систему MatLab.

2. Увійти в підсистему моделювання динамічних процесів Simulink. Після запуску Simulink відкриється вікно для побудови нової моделі (рис.4).



Рис.4 – Бібліотека Simulink

3. Побудувати структурну схему моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в програмі Simulink (рис.4). Схема будується в наступній послідовності:

Додаткова інформація:

Спочатку необхідно зібрати схему **AC voltage** → **Asynchronous Machine** і т.д. й з'єднати елементи схеми, а тільки потім можна буде вибирати параметри в **Bus Selector** (в Matlab 2013).

а) У вікні Libraries вибрати шлях SimPowerSystems→Machines→Asynchronous Machines pu Units для побудови моделі асинхронної машини у відносних одиницях. Натиснути правою кнопкою



мишки та вибрати **Add to a new model**. В результаті цього відкриється вікно для побудови нової моделі в Simulink із вставленим елементом.

- b) Вибрати шлях SimPowerSystems→Machines→ Machines Measurement
 Demux для вставлення в структурну схему блоку вимірювань.
 Натиснути правою кнопкою мишки та вибрати Add to untitled.
 Новий елемент по замовчуванню буде розміщений в те ж саме
 місце, що і перший елемент. Їх необхідно розсунути по робочому простору для того, щоб вони не накладалися один на одного.
- с) У вікні Libraries вибрати шлях Simulink→Sinks→Scope і додати п'ять осцилографів для вимірювання величин струмів статора і ротора, швидкості ротора, електромагнітного моменту та напруги живлення.
- d) Вибрати шлях SimPowerSystems→Electrical
 Sources→ AC Voltage Source і додати три елемента, що моделюють джерела змінної напруги живлення для кожної з фаз обмотки статора АД.



Scope

- e) У вікні Libraries обрати шлях Simulink→Sources→Constant, вибрати і додати один елемент, що задає константи і використовується для задання зовнішнього моменту навантаження на валу АД.
- Libraries SimPowerSystems→ f) Вибрати шлях **Measurements→ Voltage Measurement**, вибрати додати елемент, призначений для вимірювання Voltage Measurement пруги.
- g) З'єднати між собою елементи так, як показано на структурній схемі моделі пуску АД на рис.5.



Рис.5 - Структурна схема моделі пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в Matlab 2009

- 4. Задати параметри елементів схеми, зокрема, параметри асинхронного двигуна, що буде досліджуватися, згідно варіанту завдання з таблиці 1.
- а) Параметри АД задаються наступним чином. Двічі натисніть лівою кнопкою миші на елемент схеми Asynchronous Machines pu Units і відкриється вікно його властивостей (рис. 6). В рядку Rotor type не-





та

на-

밁

обхідно вибрати конструкцію машини з короткозамкненою обмоткою ротора **Squirrel-cage** і натиснути **Apply**. Перейшовши до закладини **Parameters**, необхідно ввести дані асинхронного двигуна згідно з варіантом завдання. Слід зазначити, що повна потужність задається у ВА, а лінійна напруга задається у вольтах. Всі величини опорів задаються у відносних одиницях. Також необхідно задати інерційну сталу **H**_j, коефіцієнт тертя ("friction factor"), та число пар полюсів. Натиснути **Apply**.

В програмі **Pn** [B·A] мається на увазі **Sn** [B·A]. Для визначення **Sn** необхідно застосувати формулу: **Sn= Ph(з варіанту)/соsφ**. Для всіх варіантів необхідно задавати соsφ=0,8.

Block Parameters: Asynchronous Machine pu Units	Block Parameters: Asynchronous Machine pu Units
Asynchronous Machine (mask) (link)	Asynchronous Machine (mask) (link)
Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.	Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.
Configuration Parameters Advanced	Configuration Parameters Advanced
Preset model: No	Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA),Vn(Vrms),fn(Hz)]:
Mechanical input: Torque Tm	[3730 460 60]
	Stator resistance and inductance [Rs,Lls] (pu):
Kotor type:	[0.01965 0.0397]
Reference frame: Rotor	Rotor resistance and inductance [Rr ¹ ,Llr ¹] (pu):
Mask units: pu 🗸	[0.01909 0.0397]
	Mutual inductance Lm (pu):
	1.354
	Inertia constant, friction factor and pole pairs [H(s) F(pu) p()]:
	[0.09526 0.05479 2]
	Initial conditions
	[1,0 0,0,0 0,0,0]
	Simulate saturation
	Saturation Parameters [i1,i2, (pu) ; v1,v2,(pu)]
	979,1.4799,2.2457,3.2586,4.5763,6.4763 ; 0.5,0.7,0.9,1,1.1,1.2 ,1.3,1.4,1.5]
OK Cancel Help Apply	OK Cancel Help Apply

Рис.6 – Параметри асинхронного двигуна

b) В елементі **Machines Measurement Demux** помітками необхідно виставити наступні дані (рис.7 а):

- тип машини асинхронна;
- струми ротора;
- струми статора;
- швидкість ротора;
- електромагнітний момент.

Додаткова інформація:

Вищенаведені схема і алгоритм побудови схеми виконувались в Matlab 2009. Для більш сучасних версій програми, наприклад, Matlab 2013 можна побудувати схему, зображену на Рис.8. Замість об'єкта **Machines Measurement Demux** необхідно використати **Bus Selector** з параметрами, зображеними на Рис.9.

с) В елементах AC Voltage Source необхідно задати частоту мережі (50 Гц) і лінійні номінальні значення напруги живлення асинхронного двигуна для кожної з фаз статора, причому в кожному з джерел напруги фаз A, B, C необхідно задати відповідний фазовий зсув: відповідно 0, 120 і 240 град. (рис.7 б). У подальшому при моделюванні несиметрії напруги живлення АД амплітуди і фазові зсуви напруги фази В будуть змінюватися у відповідності до виду несиметрії, що розглядається.

Function Block Parameters: Machines Measuremen	
Machine measurements (mask) (link)	
Split specified signals of various machine models measurement output vector into separate signals.	Block Parameters: AC Voltage Source
Parameters	AC Voltage Source (mask) (link)
Machine type: Asynchronous	Ideal sinusoidal AC Voltage source.
✓ Rotor currents [ira irb irc]	Parameters
Rotor currents [ir_q ir_d]	Peak amplitude (V):
Rotor fluxes [phir_q phir_d]	380*sqrt(2)
Rotor voltages [vr_q vr_d]	Phase (deg):
✓ Stator currents [ia ib ic]	120
Stator currents [is_q is_d]	Frequency (Hz):
Stator fluxes [phis_q phis_d]	50
Stator voltages [vs_q vs_d]	Sample time:
Rotor speed [wm]	0
Electromagnetic torque [Te]	Measurements None
Rotor angle [thetam] rad	
<u>OK</u> <u>Cancel</u> <u>H</u> elp <u>A</u> pply	<u>OK</u> <u>Cancel</u> <u>H</u> elp <u>A</u> pply
a)	б)

Рис.7 – Параметри елементів:

а) блок вимірювання; б) параметри джерела змінної напруги

d) В елементі **Constant** необхідно задати значення статичного моменту M_c . Якщо прийняти M_c =0, то буде розглядатися пуск АД без навантаження на валу.



Рис.8 – Структурна схема моделі пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором в Matlab 2013

Functio BusSelector This block accepts a bus as input what defines its output using a bus of the Select button to select the output Down, or Remove button to reorder signal.	n Block Para hich can be cr bject. The lef ut signals. The the selection	reated from a Bus Creator, Bus Selector t listbox shows the signals in the inpu e right listbox shows the selections. U s. Check 'Output as bus' to output a s	r or a block t bus. Use lse the Up, ingle bus
Parameters Filter by name Image: Signals in the bus Signals in the bus Image: Provide the second	Find Select>> Refresh	Selected signals Rotor measurements.Rotor currer Stator measurements.Stator curre Mechanical.Rotor speed (wm) Mechanical.Electromagnetic torqu	Up Down Remove
2	[Output as bus <u>QK</u> <u>Cancel</u> <u>H</u> elp	<u>A</u> pply

Рис.9 – Параметри об'єкта **Bus Selector**

5. Для узагальнення отриманих результатів необхідно побудувати такі таблиці і відповідні графіки:

k_A	${\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{B}}$, B	I _{уд} , в.о.	<i>М _{уд}</i> , в.о.	<i>t_{роз}</i> , с
0	380			
0,1				
0,9				
1	0			

k_{Φ}	$\varphi_B,^{\circ}$	I _{уд} , в.о.	<i>М _{уд}</i> , в.о.	<i>t_{роз}</i> , с
-1	0			
-0,8				
0,8				
1	240			

$k_3 = k_A + k_{\varPhi}$	$k_A = k_{\Phi}$	$I_{y\partial}$, в.о.	<i>М _{уд}</i> , в.о.	<i>t_{роз}</i> , с
0	0			
0,2				
1,8				
2	1			

Комп'ютерний практикум №2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В СИНХРОННОМУ ГЕНЕРАТОРІ

Частина 1

Математичне моделювання та дослідження раптового короткого замикання синхронного генератора

(2 години)

Мета роботи. Дослідження електромагнітних перехідних процесів, які відбуваються в синхронному генераторі при короткому замиканні його обмотки якоря.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Побудувати структурну схему для моделювання процесу раптового трифазного короткого замикання синхронного турбогенератора на холостому ході в пакеті MatLab – Simulink.

2. Обрати варіант ТГ з даних, що наведені в таблиці 2.

3. Промоделювати процес раптового трифазного короткого замикання синхронного ТГ із заданими параметрами на холостому ході.

4. Побудувати графіки зміни у часі наступних величин:

- струм статора *I*₁;
- електромагнітний момент M_{em} ;
- кут навантаження θ ;
- напруга на обмотці якоря *U*_{*a*};
- струм в обмотці збудження i_{s} ;
- напруга на обмотці збудження $U_{_{g}}$;
- швидкість обертання ротора *n*;
- напруга між фазою А і нульовою точкою трансформатора.

5. Дослідити вплив параметрів ТГ x_d і x_d'' на наступні характеристики раптового КЗ:

- ударний струм обмотки якоря;
- ударний електромагнітний момент.

Для цього провести серію розрахунків при різних значеннях зазначених параметрів.

6. Узагальнити отримані результати і написати висновки по роботі.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Класичним прикладом перехідних процесів в синхронних машинах є раптове трифазне коротке замикання синхронного генератора (СГ), що працював на холостому ході. Такий процес супроводжується великими ударними струмами і моментами, які можуть ушкодити конструкцію машини. Тому вивчення цих процесів і дослідження впливу на них окремих параметрів генератора являє актуальну задачу. Особливо це актуально для потужних синхронних генераторів – турбогенераторів (ТГ), на прикладі яких розглядається зазначений процес короткого замикання. Зазвичай ТГ працює на електромережу через підвищуючий трансформатор, а раптове КЗ в більшості випадків відбувається за трансформатором. Цю обставину потрібно врахувати при моделюванні.

Для моделювання процесу короткого замикання ТГ використовується система **MatLab – Simulink**, в якій формується відповідна структурна схема.

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

- 1. Завантажити на комп'ютері систему MatLab.
- 2. Увійти в підсистему моделювання динамічних процесів Simulink.

3. Побудувати структурну схему для моделювання процесу раптового трифазного КЗ синхронного турбогенератора на холостому ході (рис.10).



Рис.10 – Структурна схема для моделювання раптового трифазного КЗ Процедура побудови структурної схеми є аналогічною, як і в попередній ча-

стині комп'ютерного практикуму №2. Схема складається з наступних основних елементів:

 Синхронний генератор (турбогенератор) Synchronous Machine pu Standart в системі відносних одиниць. На початку процесу ТГ працює в режимі холостого ходу, який моделюється підключенням ТГ до трифазного активного навантаження, що має велике числове значення опору.



• Трифазне електричне навантаження **Three-phase Series RLC Branch**, яке моделює навантаження ТГ на холостому ході (моделювання початкових умов перехідного процесу короткого замикання). В навантаженні задається відмін-

ною від нуля тільки активна складова опору, величина якої складає 10³ … 10⁶ Ом.

До цього навантаження треба додатково паралельно підключити опір R = 66 Ом.

• Трифазний вимірювач електричних величин **Three-phase V-I Measurement** (лінійної напруги **U**).





- Трифазний двохобмотковий підвищуючий трансфортор Three-phase Transformer (two windings). Цей елемент моделює вплив параметрів блокового трансрматора на характеристики раптового короткого закання. Напругу мережі необхідно задати 220 кВ.
- Два трифазні ключі Three-phase Breaker. Один з них призначений для з'єднання ТГ з навантаженням в режимі холостого ходу, другий – для створення короткого замикання на вихідних затискачах блокового трансформатора.
- Функціональний блок для вимірювання параметрів синхронної машини Machine Measurement Demux; Основний елемент структурної схеми - синхронний генератор. На рис.11 зображені вікна параметрів СГ.

Block Parameters: Synchronous Machine pu Standard	Block Parameters: Synchronous Machine pu Standard
Synchronous Machine (mask) (link)	Synchronous Machine (mask) (link)
Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame.	Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame.
Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.	Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.
Configuration Parameters Advanced	Configuration Parameters Advanced
Preset model: No	Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]:
Mechanical input: Mechanical power Pm	[285.5E6 16500 50]
Rotor type:	Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq' Xq'' Xl] (pu):
	[1.62, 0.28, 0.203, 1.63, 0.46, 0.292, 0.2032]
Mask units: per unit standard parameters	d axis time constants: Open-circuit
	q axis time constants: Short-circuit
	Time constants [Tdo' Tdo'' Tq' Tq''] (s):
	[6.1, 0.02, 0.4, 0.05]
	Stator resistance Rs (pu):
	0.0025
	Inertia coeficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p]:
	[3.701]
	Initial conditions [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]:
	[0000001]
	Simulate saturation
<u>OK</u> <u>Cancel</u> <u>Help</u> <u>Apply</u>	QK <u>C</u> ancel <u>H</u> elp <u>Apply</u>

Рис.11 – Вікна параметрів синхронного генератора





B

Demux

Вікна параметрів мають наступні основні вкладки:

- **Configuration**. Дозволяє вибрати одну із запропонованих моделей синхронної машини у вкладці **Preset Mode**. При цьому всі інші параметри машини будуть задаватися автоматично. Якщо у вкладці **Preset Mode** виставити **No**, то надалі потрібно самостійно задати всі параметри синхронної машини.
- Rotor type. Дозволяє вибрати тип ротора: явнополюсний (Salient-pole) або неявнополюсний (Round).
- **Рагатется.** В рядках задаються всі параметри СГ. Зокрема у першому рядку задаються номінальні дані машини: номінальна потужність S_{μ} (ВА), лінійна напруга U_{μ} (В), частота f_{μ} (Гц). В наступних рядках задаються електричні параметри СГ x_d, x'_d, x'_d і т.д., постійні часу затухання перехідних струмів T'_{d0}, T''_{d0} і т.д., активний опір обмотки статора, інерційна стала, коефіцієнт тертя, число пар полюсів. В останньому рядку задаються початкові умови.
- 4. Запустити розроблену модель на розв'язання (закладки Simulation→ Start).

	•	-	•	•		-	-			
Nº	Пара			метри		Навантаження				
ва- ріа- нту	<i>S</i> _н , MBA	$U_{\mu\Gamma} = U_{\mu M}$, KB	$f_{_{\scriptscriptstyle H}}$, Гц	p	Тип рото- ра	H , c	<i>F</i> , в.о.	<i>R</i> , Ом	<i>L</i> , Гн	С, Ф
1	20	6,3	50	1	Я	103	0,0200	30	110	15
2	25	10,5	60	2	НЯ	108	0,0210	110	20	30
3	30	6,3	50	3	Я	113	0,0221	50	110	15
4	35	10,5	60	4	КН	119	0,0232	40	15	50
5	40	13,8	50	1	R	125	0,0243	60	35	110
6	45	15,75	60	2	НЯ	131	0,0255	60	15	30
7	50	18	50	3	Я	138	0,0268	50	30	70
8	55	20	60	4	НЯ	145	0,0281	15	50	30
9	60	24	50	1	Я	152	0,0295	110	30	60
10	65	6,3	60	2	КН	159	0,0310	60	30	90
11	70	10,5	50	3	Я	167	0,0326	80	65	15
12	20	6,3	60	4	НЯ	176	0,0342	15	45	60
13	25	10,5	50	1	Я	103	0,0359	70	30	110
14	30	13,8	60	2	НЯ	98	0,0200	60	80	15
15	35	15,75	50	3	Я	93	0,019	80	60	30
16	40	18	60	4	НЯ	88	0,018	80	30	130
17	45	20	50	1	Я	84	0,017	110	95	30
18	50	24	60	2	НЯ	80	0,016	15	110	80
19	55	6,3	50	3	Я	76	0,015	90	15	150
20	60	10,5	60	4	НЯ	72	0,015	80	110	15
21	65	6,3	50	1	Я	68	0,014	110	15	30
22	70	10,5	60	2	НЯ	65	0,013	100	30	170
23	20	13,8	50	3	R	62	0,013	15	125	30
24	25	15,75	60	4	НЯ	58	0,012	110	30	15
25	30	18	50	1	Я	56	0,011	110	45	190

Таблиця 2 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №2

Я –явно полюсний СГ, НЯ – неявно полюсний СГ ($X_d = X_q$).

Продовження таблиці 2

								Акти-			
Nº			Індуі	ктивні	опори			вний	Ча	асові ста	алі
ва-		[1	1			1	опір		1	
ріа- нту	X_d ,	x_d^\prime ,	x''_d ,	X_q ,	x_q^\prime ,	x_q'' ,	xl,	$R_{\scriptscriptstyle S}$,	T_d^{\prime} ,	T''_{r}	T_q'' ,
5	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	в.о.	С		С
1	5,190	0,449	0,305	3,089	0,521	0,162	0,144	0,027	6,64	0,045	0,025
2	4,943	0,428	0,291	4,943	0,428	0,291	0,137	0,026	6,33	0,043	0,024
3	4,708	0,407	0,277	2,802	0,472	0,146	0,130	0,024	6,03	0,041	0,023
4	4,483	0,388	0,264	4,483	0,388	0,264	0,124	0,023	5,74	0,039	0,021
5	4,270	0,369	0,251	2,541	0,428	0,132	0,118	0,022	5,47	0,037	0,020
6	4,067	0,352	0,239	4,067	0,352	0,239	0,113	0,021	5,21	0,035	0,019
7	3,873	0,335	0,228	2,305	0,389	0,119	0,107	0,020	4,96	0,034	0,018
8	3,688	0,319	0,217	3,688	0,319	0,217	0,102	0,019	4,72	0,032	0,017
9	3,513	0,304	0,207	2,091	0,352	0,107	0,097	0,018	4,50	0,030	0,017
10	3,346	0,289	0,197	3,346	0,289	0,197	0,093	0,017	4,28	0,029	0,016
11	3,186	0,276	0,187	1,896	0,320	0,097	0,088	0,017	4,08	0,028	0,015
12	3,035	0,263	0,179	3,035	0,263	0,179	0,084	0,016	3,89	0,026	0,014
13	2,890	0,250	0,170	1,720	0,290	0,305	0,080	0,015	3,70	0,025	0,014
14	2,746	0,238	0,162	2,746	0,238	0,162	0,076	0,014	3,52	0,024	0,045
15	2,608	0,226	0,153	1,552	0,262	0,277	0,072	0,014	3,34	0,023	0,043
16	2,478	0,214	0,146	2,478	0,214	0,146	0,069	0,013	3,17	0,021	0,041
17	2,354	0,204	0,138	1,401	0,236	0,251	0,065	0,012	3,01	0,020	0,039
18	2,236	0,193	0,132	2,236	0,193	0,132	0,062	0,012	2,86	0,019	0,037
19	2,124	0,184	0,125	1,264	0,213	0,228	0,059	0,011	2,72	0,018	0,035
20	2,018	0,175	0,119	2,018	0,175	0,119	0,056	0,010	2,58	0,017	0,034
21	1,917	0,166	0,113	1,141	0,192	0,207	0,053	0,010	2,45	0,017	0,032
22	1,821	0,158	0,107	1,821	0,158	0,107	0,050	0,009	2,33	0,016	0,030
23	1,730	0,150	0,102	1,030	0,174	0,187	0,048	0,009	2,22	0,015	0,029
24	1,644	0,142	0,097	1,644	0,142	0,097	0,046	0,009	2,10	0,014	0,028
25	1,562	0,135	0,092	0,929	0,157	0,170	0,043	0,008	2,00	0,014	0,026

На рис.12, як приклад, приведені розрахункові осцилограми струмів в фазах обмотки якоря та електромагнітного моменту турбогенератора потужністю 200 МВт при раптовому трифазному КЗ на холостому ході. Початок КЗ починається в момент часу 0,04 с. Струми і момент виражені у відносних одиницях, час у секундах.



Рис.12 – Розрахункові залежності у часі: а) струмів в фазах обмотки якоря; б) електромагнітного моменту

Частина 2

Математичне моделювання та дослідження протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу

(2 години)

Мета роботи. Дослідження електромагнітних перехідних процесів, які відбуваються в синхронному генераторі при протифазному вмиканні його обмотки якоря в електричну мережу.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Побудувати структурну схему для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу в пакеті MatLab – Simulink.

2. Обрати варіант ТГ з даних, що наведені в таблиці 2.

3. Промоделювати процес протифазного вмикання синхронного ТГ в електромережу.

4. Побудувати графіки зміни у часі наступних величин:

- струм статора *I*₁;
- електромагнітний момент *M*_{ем};
- кут навантаження θ ;
- напруга на обмотці якоря *U*_{*a*};

- струм в обмотці збудження *i*_{*e*};
- напруга на обмотці збудження U_{s} ;
- швидкість обертання ротора *n*;
- напруга між фазою А і нульовою точкою трансформатора.

5. Дослідити вплив параметрів ТГ x_d і x_d'' на наступні характеристики раптового КЗ:

- ударний струм обмотки якоря;
- ударний електромагнітний момент.

Для цього провести серію розрахунків (8-10 точок) при варіації наступних даних:

- величини індуктивного опору X_d (від 0,1* X_d до 2* X_d);
- величини індуктивного опору X''_d (від 0,1* X_d до 2* X_d).

6. Дослідити вплив зміни величини фази мережі $\varphi_{мережi}$ на значення величин ударного струму I_{vo}^* і ударного моменту M_{vo}^* .

7. Узагальнити отримані результати і написати висновки по роботі.

Теоретичні відомості і програмне забезпечення. Помилкове протифазне вмикання синхронного генератора в електромережу при його включенні на паралельну роботу є одним з найбільш важких перехідних процесів, який супроводжується великими ударними струмами і моментами. При несприятливих умовах включення, коли ЕРС фази генератора і напруга мережі знаходяться в протифазі, ударні струми і моменти перевищують аналогічні струми і моменти при раптовому КЗ. Тому важливим є дослідження зазначеного процесу.

Для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу використовується система **MatLab – Simulink**, в якій формується відповідна структурна схема.

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

- 1. Завантажити на комп'ютері систему MatLab.
- 2. Увійти в підсистему моделювання динамічних процесів Simulink.

3. Побудувати структурну схему для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу (рис.13). Зображена на рис.13 структурна схема відрізняється від представленої на рис.7 схеми дослідження раптового КЗ тим, що на вихідних затиска-



чах блочного трансформатора замість короткозамикаючого з'єднання через вимикач підключається трифазне джерело напруги **Three-phase Source**, яке моделює трифазну електричну мережу.



Рис.13 – Структурна схема для моделювання процесу протифазного вмикання синхронного генератора в електромережу

В зазначеному елементі **Three-phase Source** (рис.14) необхідно задати: лінійну напругу мережі, фазовий кут зсуву між ЕРС генератора і напругою мережі, частоту струму в мережі, а також електричні параметри мережі (активний і індуктивний опори). У разі, якщо фазовий кут зсуву сягає величини 180°, ударні стуми і моменти при перехідному процесі будуть найбільшими. Доцільно дослідити плив кута на величини ударних струмів і моменту, зокрема при куті 0° буде правильне включення.

4. Запустити розроблену модель на розв'язання (закладки Simulation→ Start).
5. Дослідити вплив зміни величини фази мережі *φ_{мережі}* на значення величин

ударного струму I_{vo}^* і ударного моменту M_{vo}^* . Навести таблиці і графіки.

$\begin{array}{ c c c c c }\hline M^*_{y\partial} & & & \\ \hline I^*_{y\partial} & & & \\ \hline \end{array}$	$\varphi_{mepe imes i}$	0	20	 180
$I_{y\partial}^*$	$M^*_{_{y\partial}}$			
	$I_{y\partial}^*$			

Block Parameters: Three-Phase Source
Three-Phase Source (mask) (link)
Three-phase voltage source in series with RL branch.
Parameters
Phase-to-phase rms voltage (V):
220e3
Phase angle of phase A (degrees):
180
Frequency (Hz):
50
Internal connection: Yg
Specify impedance using short-circuit level
Source resistance (Ohms):
1.6
Source inductance (H):
0.0256
<u>OK</u> <u>Cancel</u> <u>H</u> elp <u>A</u> pply

Рис.14 – Параметри Three-phase Source

Комп'ютерний практикум №3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ЕНЕРГІЇ В ПРОГРАМІ COMSOL MULTIPHYSICS

Програма роботи:

Частина 1. Змоделювати розподіл електромагнітного поля в активних частинах трифазного трансформатора.

Частина 2. Змоделювати розподіл електромагнітного поля в активних частинах короткозамкненого асинхронного двигуна.

Короткий опис програми COMSOL Multiphysics:

За допомогою пакета COMSOL Multiphysics можна моделювати практично всі фізичні процеси, які описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних (ДРЧП). Ці рівняння чисельно розв'язуються методом скінченних елементів. Програма містить різні бібліотеки ДРЧП і засоби для моделювання: засоби для геометричних побудов, генератори сітки, різні вирішувачі, які допоможуть швидко впоратися навіть з найскладнішими завданнями лінійних і нелінійних задач. COMSOL Multiphysics дозволяє вирішувати мультифізичні завдання, які описуються комбінацією різних ДРЧП і завдяки цьому є можливість комплексно проаналізувати фізичні моделі. Структура інтерфейсу COMSOL Multiphysics забезпечує простоту і зручність у використання. Програма COMSOL Multiphysics призначена для розробників, експериментаторів і наукових співробітників. Завдяки широкому вибору функцій зображення результатів розрахунків програма може використовуватися у вищих навчальних закладах.

Методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму

Частина 1

Математичне моделювання електромагнітного поля силового трансформатора (4 години)

Мета роботи. Здобути навички роботи з сучасним програмним комплексом Comsol Multiphysics на прикладі математичного моделювання електромагнітного поля силового трансформатора.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Створити коректну математичну модель трансформатора:

- накреслити трансформатор в програмі Autocad
- імпортувати геометрію трансформатора в програму Comsol
- задати параметри елементів трансформатора
- задати параметри часозалежної задачі
- задати параметри виведення результатів розрахунку
- 2. Розрахувати електромагнітне поле трансформатора

3. Продемонструвати зміни струмів в обмотках і магнітного потоку магнітопровода в часі.

Особливості процесу моделювання:

1. Варіант трансформатора (Т) для моделювання вибирається таким, який раніше студент спроектував в курсовому проекті при вивченні дисципліни "Основи автоматизованого проектування електричних машин". Можна також обрати інший варіант з Таблиці 3.

2. При моделювання трансформатора обов'язково в деталях зобразити обмотки трансформатора.

a) Будувати двовимірний активний переріз трансформатора можна в програмах:

- безпосередньо в Comsol Multiphysics за допомогою засобів у вкладці **Geometry**;
- в AutoCad;
- DraftSight;
- в будь-якій іншій доступній програмі з можливість експорту геометрії трансформатора за допомогою *.dxf-файлів в Comsol Multiphysics.

б) Кожна з двох обмоток на кожному стержні, як відомо, буває трьох видів: гвинтова, циліндрична та безперервна спіральна котушкова обмотка.

в) В кожній з обмоток необхідно обов'язково детально зобразити кожен провідник(можна не розділяючи на паралельні провідники), кількість котушок, кількість слоїв і т.д. Ізоляцію провідників з метою спрощення можна не відображати.

г) Магнітопровід трансформатора зображується нешихтованим.

д) Процес креслення, наприклад, в AutoCad, необхідно виконувати охайно і точно. Оскільки якщо між двома лініями залишиться проміжок (тобто не використовувалася команда –, або –, то в процесі побудови сітки скінченних елементів в цій точці програма Comsol Multiphysics видасть помилку і доведеться перемальовувати в AutoCad, вже більш охайно).

3. В загальному випадку створювати модель трансформатора або асинхронного двигуна можна як без насичення, просто задавши незмінну магнітну

проникність заліза **µ** _{Fe}, або робити розрахунки із врахуванням ефекту магнітного насичення магнітопроводу, що збільшує час розрахунку. Цей вибір студент робить на свій розсуд.

4. Розрахунок математичної моделі здійснюється для режиму номінального навантаження.

								1 1	1 1	
Варіант	1*	2*	3*	Вид обмотки НН	4*	Вид обмотки ВН	5*	6*, 7*, 8*, 9*, 10*	$J_{\rm HH} = J_{\rm BH}, \times 10^{6} {\rm A/m^2}$	μ _{Fe}
1	360	1440	230	Циліндрична	6	НСКО	15	4	4,00	800
2	380	1520	250	Гвинтова	9	Циліндрична	16	5	4,15	900
3	400	1600	270	НСКО	7	НСКО	17	6	4,30	1000
4	420	1680	290	Циліндрична	8	Циліндрична	14	7	4,45	1100
5	440	1760	310	Гвинтова	11	НСКО	18	4	4,60	1200
6	460	1840	330	НСКО	13	Циліндрична	10	5	4,75	1300
7	480	1920	350	Циліндрична	15	НСКО	12	6	4,90	1400
8	360	1440	230	Гвинтова	16	Циліндрична	6	7	5,05	1500
9	380	1520	250	НСКО	17	НСКО	9	4	5,20	1600
10	400	1600	270	Циліндрична	14	Циліндрична	7	5	5,35	800
11	420	1680	290	Гвинтова	18	НСКО	8	6	5,50	900
12	440	1760	310	НСКО	10	Циліндрична	11	7	5,65	1000
13	460	1840	330	Циліндрична	12	НСКО	13	4	5,80	1100
14	480	1920	350	Гвинтова	6	Циліндрична	7	5	5,95	1200
15	360	1440	230	НСКО	9	НСКО	15	6	6,10	1300
16	380	1520	250	Циліндрична	7	Циліндрична	16	7	6,25	1400
17	400	1600	270	Гвинтова	8	НСКО	17	4	6,40	1500
18	420	1680	290	НСКО	11	Циліндрична	14	5	6,55	1600
19	440	1760	310	Циліндрична	13	НСКО	18	6	4,00	800
20	460	1840	330	Гвинтова	15	Циліндрична	10	7	4,15	900
21	480	1920	350	НСКО	16	НСКО	12	4	4,30	1000
22	360	1440	230	Циліндрична	17	Циліндрична	6	5	4,45	1100
23	380	1520	250	Гвинтова	14	НСКО	9	6	4,60	1200
24	400	1600	270	НСКО	18	Циліндрична	7	7	4,75	1300
25	420	1680	290	Циліндрична	10	НСКО	8	4	4,90	1400
26	440	1760	310	Гвинтова	12	Циліндрична	11	5	5,05	1500
27	460	1840	330	НСКО	6	НСКО	13	6	5,20	1600
28	480	1920	350	Циліндрична	9	Циліндрична	7	7	5,35	800
29	360	1440	230	Гвинтова	7	НСКО	18	4	5,50	900
30	380	1520	250	НСКО	8	Циліндрична	10	5	5,65	1000

Таблиця 3 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №3. Моделювання трансформатора

Поз	начення:
1*	Діаметр стержня, мм
2*	Висота стержня, мм
3*	Висота ярма, мм
4*	Кількість шарів/витків/котушок обмотки НН
5*	Кількість шарів/витків/котушок обмотки ВН
6*	Ізоляція між шарами/витками/котушками, мм
7*	Ширина обмотки НН, см
8*	Ширина обмотки ВН, см
9 *	Відстань між обмотками НН и ВН, см
10 *	Відстань між обмотками ВН сусідніх фаз, см



Рис. 15 – Ескіз трансформатора

Алгоритм побудови моделі трансформатора (без насичення)

1.Побудова починається з вибору геометрії 2D (не вибирати вісесиметричну): Відкрити Comsol Multiphysics (створити новий *.mph файл)

File \rightarrow New \rightarrow Model Wizard \rightarrow 2D



2. Вибрати фізику Magnetic fields (mf) у вкладці AC/DC, додати (add) вибрану фізику і нажати Done

	Search
AC/DC	
Electric Currents (ec)	[
💐 Electric Currents, Shell (ecs)	
Electrical Circuit (cir)	
Electrostatics (es)	
Magnetic Field Formulation (mth)	
(2) Magnetic Fields No Currents (mfnc)	
Magnetic and Electric Fields (mef)	
Rotating Machinery, Magnetic (rmm)	
K Charged Particle Tracing (cpt)	
Macoustics	
Chemical Species Transport	
Electrochemistry	
Fluid Flow	
m	
	Add
dded physics:	-
	Remov
Space Dimension	St.

Рис.16 – Вибір фізики математичної моделі

3. В САД-програмі, з якої буде імпортуватись креслення навколо трансформатора необхідно створити прямокутник для того, щоб в цій області в подальшому відображались магнітні поля навколо обмоток. Після цього – зберегти файл в форматі *.dxf



Рис.17 – Креслення Т в програмі Autocad

4. У вкладці **Model Builder** правою кнопкою мишки обрати **Global Definition** і додати **Variables**



Рис.18 – Додання Variables у вкладці Model Builder

5. Щоб створити трифазну систему струмів, необхідно додати наступні змінні:

Name	Expression	Unit	Descript
Ja	J*cos(314*t)		
Jb	J*cos(314*t-2*3.14/3)	1	
lc	J*cos(314*t-4*3.14/3)	1	
J_A	Ja		
J_B	Jb		
J_C	Jc	1	
J	5еб		
t	1		

Рис.19 – Задання струмів у вкладці Variables

6. У вкладці Geometry1 додати Import:



7. Відкрити файл, створений раніше у CAD-програмі та імпортувати його, натиснувши кнопку **Import**:

Build Selected Build All Objects Import Geometry import: Any importable file Filename: Browse Import Import	
Import Geometry import: Any importable file Filename: Browse Import Import	
Geometry import: Any importable file Filename: Browse	
Any importable file Filename: Browse Import Import	
Filename: Browse	·]
Browse	
Browse	
 Selections of Resulting Entities 	
Create selections	
Contribute to: None	

Рис.21 – Імпортування геометрії з файла

8. Для того, щоб задати масштабування в міліметрах (якщо цього не було зроблено в AutoCad) необхідно відкрити **Geometry**→ **Transforms**→**Scale** і вибрати всі елементи в вікні **Graphics** (Ctrl+A), прописавши Scale Factor =0.001 та натиснувши "Build All".

🍯 🗅 🃂 🔒 😣 🕤 ले	■î 中×	• 🕅 Я	- a -			- 200	-			-		-	-
File V Home Definit	ions Geometry	Physi	cs Mesh	Study	Results								
Component Add 1 • Component • Model	P _i Parameters a= Variables → f(x) Functions → Definitions	Build All Geor	Hinport	Browse Materials	Hew Material	Magnetic Fields + Phys	Add Physics	Build Mesh Me	Mesh 1 +	Compute	Study 1 • Study	Add Study	D
Model Builder Add Mate	rial × ≣↓	• ‡ S	cale Build Selec	ted 🏢 Bui	ild All Objects							•	ŧ
 Ibba5.mph (root) Global Definitions Component 1 (com Definitions Geometry 1 Import 1 (in Split 1 (spl1) Scale 1 (scale) Scale 1 (scale) Form Union Magnetic Fields Mesh 1 So Study 1 Results Mesh 1 So Study 1 Results Union Study 1 Results Union Study 1 Results Study 1 Results Surface 1 Contour 1 Export Reports 	=+ p1) (fin) (fin) (mf) Density Norm (mf)	In In Sc Fa X: y:	Input put objects: put objects: spl1(spl1(3 spl1(3 spl1(6 spl1)))))))))))))))))))	ing Entities							New	+ - - - - - - -

Рис.22 – Зміна масштабу імпортованої геометрії

9. Розбити креслення на окремі елементи за допомогою доданої вкладки Ge-

ON D

ometry1 \rightarrow Conversions $\rightarrow \frac{1}{2}$

I активувати параметр Split кнопкою ON Active

Після цього клікнути на макет креслення в полі **Graphics** щоб додати його в вікно **Input**

Лівою кнопкою мишки клікнути на вкладку **Geometry1** та натиснути у вікні Geometry – **Build All (**або F8**)**

Model Builder ← → ≣ • ☜ • ≣† ≣↓	- ‡	Geometry	- ‡
 Untitled.mph (root) Global Definitions Component 1 (comp1) Definitions Geometry 1 Import 1 (imp1) Split 1 (spl1) Form Union (fin) Materials Magnetic Fields (mf) Mesh 1 Results 		 Units Build All (F8) Scale values when changing units Length unit: m Angular unit: Degrees Advanced Default relative repair tolerance: 1E-6 Automatic rebuild 	•

Рис.23 – Побудова всіх елементів у вкладці **Geometry1**

10. Використовуючи **Material library** у вкладці **Materials** додати матеріали: повітря і залізо. Мідь в обмотках задавати не треба, бо в даній задачі обмотки слугують як джерела поля і в них не досліджуються вихрові струми. Для цього у вкладці Materials обрати Add Material

Та у новому вікні додати Soft iron (without losses) та Air :



Рис.24 – Додавання матеріалів з бібліотеки матеріалів

11. Задати магнітну проникність заліза, μ=1000, клікнувши на Materials→

Soft Iron (without losses) (mat1, та обравши вікні Material відповідний параметр

**	Property	Name	Value
A	Relative permeability	mur	1000

Рис.25 – Задання µ матеріалу

Після цього – у вікні **Graphics** обрати блоки, що відповідають магнітопроводу трансформатора.



Рис. 26 – Вибір елементів магнітопроводу

Клікнувши на вкладку ^В Кіг (mat2), обрати блоки, що відповідають області, з магнітною проникністю повітря (в тому числі – обмотки):



Рис.27 – Вибір всіх елементів окрім магнітопроводу

12. Для врахування ефекту насичення в магнітопроводі необхідно: У вкладці Magnetic Fields (mf) додати вкладку Ampere's Law:



Рис.28 – Додавання вкладки фізичних властивостей Ampere's Law

13. Натиснувши на вкладу Ampere's Law вибрати магнітопровід(залізо):



Рис.29 – Додавання фізичних властивостей Ampere's Law

14. Змінити внизу цього ж Ampere's Law у вікні Magnetic Field на HB curve:



Рис.30 – Зміна параметрів у вкладці Ampere's Law

15. Задати трифазну систему струмів. Для цього, в вікні **Model Builder,** обрати **External Current Density**



Рис.31 – Задання зовнішніх джерел густин струму

Та створити для обмоток кожної фази свій параметр External Current Density (12шт.), обравши відповідну область в вікні Graphics.



Рис.32 – Задання зовнішніх джерел густин струму в обмотках Т, що направлені в площину



Рис.33 – Задання зовнішніх джерел густин струму в обмотках Т, що направлені з площини

Індекс 1 означає, що струми направлені в площину, а індекс 2 – з площини. При цьому необхідно враховувати зворотній напрям протікання струму в кожній з фаз.

16. Додати Free Triangular у вкладці Mesh :



Рис.34 – Додання параметрів сітки Free Triangular у вкладці Mesh

17. Додати параметр **Time Dependent** у вкладці **Study1**, попередньо додавши **Study1** на панелі інструментів:



Рис.35 – Задання параметрів Time Dependent у вкладці Study1

Також – виставити необхідні параметри для **Time Dependent** у відповідному вікні.

Time Dependent					
▼ Study Setting	js				
Time unit:	s	•			
Times:	range(0,0.0002,0.02)	s 🗔			
Relative tolerance:	0.01				

Рис.36 – Задання параметрів Time Dependent у вкладці Study1



18. Для розрахунку моделі натиснути На панелі інструментів «Compute»

19. У вкладці Model Builder додати Contour1, натиснувши правою кнопкою мишки на Magnetic flux desity



Рис.37 – Додавання вкладки Contour1 у вкладці Magnetic flux density

20. Для виводу результатів, додати необхідні параметри, як показано у прикладі і клікнути **Plot**.

Model Builder 🔹 🖡	Surface • •
	DI Plot
T simpled 4.mph (root) Global Definitions	▼ Data
a= Variables 1 4 Q Component 1 (comp1)	Data set: From parent
Definitions Geometry 1	
 Materials 	Expression:
 Magnetic Fields (mf) Mesh 1 	mf.normB
Size	Unit:
Free Triangular 2	T
Step 1: Time Dependent	Description:
Image: Solver Configurations	Magnetic flux density norm
 Data Sets 	▷ Title
Views 8:85 8:85 Berived Values	Range
Tables	 Coloring and Style
Magnetic Flux Density Norm (mf) Surface 1	Coloring: Color table
Scontour 1	Color table: Rainbow
Animation 1	✓ Color legend
🔩 Reports	Reverse color table
	Symmetrize color range
	Wireframe
	Quality
	Inherit Style

Рис.38 – Задання параметрів у вкладці Surface1

21. Для експорту анімації фізичного процесу, що відображається в часовій зміні розподілу магнітного поля і індукції в активних частинах трифазного трансформатора необхідно у вкладці «**Export**» додати «**Animation**» та натиснути «**Export**»



Рис.39 – Додавання вкладки Animation

22. Задання параметрів анімації наведені в комп'ютерному практикумі "Математичне моделювання асинхронного двигуна".

Частина 2

Математичне моделювання електромагнітного поля короткозамкненого асинхронного двигуна

(4 години)

Мета роботи. Здобути навички роботи з сучасним програмним комплексом Comsol Multiphysics на прикладі математичного моделювання електромагнітного поля короткозамкненого асинхронного двигуна.

Програма роботи комп'ютерного практикуму:

1. Створити коректну математичну модель асинхронного двигуна:

- накреслити асинхронний двигун в програмі Autocad
- імпортувати геометрію асинхронного двигуна в програму Comsol
- задати параметри елементів асинхронного двигуна
- задати параметри часозалежної задачі
- задати параметри виведення результатів розрахунку

2. Розрахувати та візуалізувати електромагнітне поле короткозамкненого асинхронного двигуна.

3. Продемонструвати зміни струмів в обмотках і магнітного потоку магнітопровода в часі.

Особливості процесу моделювання:

1. Варіант асинхронного двигуна для моделювання вибирається таким, який раніше студент спроектував в курсовому проекті при вивченні дис-

ципліни "Основи автоматизованого проектування електричних машин". Можна також обрати інший варіант з Таблиці 4.

- 2. Вибираємо одношарову обмотку.
- 3. Пази відкриті.
- Матеріал обмоток статора необхідно задавати як повітря. Це пояснюється тим, що обмотка статора зроблена з великої сукупності провідників, а не з масивного об'єму міді. Тому змінне магнітне поле не індукує вихрові струми в обмотці.
- 5. Матеріал обмоток ротора мідь.
- 6. Немає необхідності задавати густину струму в обмотці ротора. Густина струму в обмотці ротора створюється як наслідок в результаті індукування ЕРС.
- 7. Розрахунок математичної моделі здійснюється для режиму номінального навантаження.

								-	2	2					
Варіант	m	р	Z1	q	Z2	D1_зовн	D1_внутр	1*	δ, мм	D2_зовн	2*	k_ярма	D_валу	J 1, ×10 ⁶ А/м ²	μ Fe
1	3	1	18	3	15	500	230	300	0,8	228	137	0,6	55	4,00	800
2	3	1	24	4	23	470	216	306	1	214	139	0,65	56	4,15	900
3	3	1	30	5	29	440	202	308	1,2	200	140	0,7	56	4,30	1000
4	3	1	36	6	33	410	189	308	1,5	186	139	0,75	56	4,45	1100
5	3	2	24	2	22	380	175	304	1,7	171	137	0,8	55	4,60	1200
6	3	2	36	3	33	350	161	210	2	157	94	0,6	38	4,75	1300
7	3	2	48	4	47	320	147	208	0,8	146	95	0,65	38	4,90	1400
8	3	3	36	2	34	290	133	203	1	131	92	0,7	37	5,05	1500
9	3	3	54	3	53	260	120	195	1,2	117	88	0,75	35	5,20	1600
10	3	1	18	3	15	230	106	184	1,5	103	82	0,8	33	5,35	800
11	3	1	24	4	22	200	92	120	1,7	89	53	0,6	21	5,50	900
12	3	1	30	5	27	500	230	325	2	226	147	0,65	59	5,65	1000
13	3	1	36	6	33	470	216	329	0,8	215	150	0,7	60	5,80	1100
14	3	2	24	2	23	440	202	330	1	200	150	0,75	60	5,95	1200
15	3	2	36	3	34	410	189	328	1,2	186	149	0,8	60	6,10	1300
16	3	2	48	4	45	380	175	228	1,5	172	103	0,6	41	6,25	1400
17	3	3	36	2	33	350	161	228	1,7	158	102	0,65	41	6,40	1500
18	3	3	54	3	51	320	147	224	2	143	100	0,7	40	6,55	1600
19	3	1	18	3	15	290	133	218	0,8	132	99	0,75	40	4,00	800
20	3	1	24	4	21	260	120	208	1	118	94	0,8	38	4,15	900
21	3	1	30	5	28	230	106	138	1,2	103	62	0,6	25	4,30	1000
22	3	1	36	6	33	200	92	130	1,5	89	58	0,65	23	4,45	1100
23	3	2	24	2	23	500	230	350	1,7	227	159	0,7	63	4,60	1200
24	3	2	36	3	34	470	216	353	2	212	159	0,75	64	4,75	1300
25	3	2	48	4	46	440	202	352	0,8	201	161	0,8	64	4,90	1400
26	3	3	36	2	35	410	189	246	1	187	112	0,6	45	5,05	1500
27	3	3	54	3	51	380	175	247	1,2	172	112	0,65	45	5,20	1600
28	3	1	18	3	16	350	161	245	1,5	158	111	0,7	44	5,35	800
29	3	1	24	4	21	320	147	240	1,7	144	108	0,75	43	5,50	900
30	3	1	30	5	27	290	133	232	2	129	104	0.8	41	5.65	1000

Таблиця 4 – Варіанти завдань до комп'ютерного практикуму №3. Моделювання асинхронного двигуна

Позначення:

1* D1_ярма_внутр = k_ярма*D1_зовн

2* D2_ярма_зовн = k_ярма*D2_зовн



- m кількість фаз;
- р кількість пар полюсів;
- Z1 кількість пазів статора;
- q число пазів на палюс і фазу;
- 1* зовнішній діаметр магнітопровода статора(D1наруж);
- 2* внутрішній діаметр розточки статора(D1внутр);
- 3* діаметр, що визначає глибину пазів статора(1*);
- 4* зовнішній діаметр ротора(D2наруж);
- 5* діаметр, що визначає глибину пазів ротора(2*);
- 6* повітряний проміжок(зазор);
- 7* діаметр вала ротора;
- J1 густина струму в обмотці статора;
- μ магнітна проникність

магнітопровода статора.

Рис. 40 – Ескіз асинхронного двигуна

Алгоритм побудови моделі асинхронного двигуна

1.Побудова починається з вибору геометрії 2D (не вибирати вісесиметричну): Відкрити Comsol Multiphysics (створити новий *.mph файл)





Рис.41 – Вибір фізики математичної моделі

3. Для подальшого зручного створення моделі в програмі Comsol слід розмістити центр валу в центрі координат в моделі AutoCAD. Також необхідно виставити в налаштуваннях одиниці виміру – метри. І будувати за заданим варіантом креслення у метрах.

Після цього – зберегти файл в форматі *.dxf



Рис.42 – Креслення АД в програмі Autocad

4. У вкладці **Model Builder** правою кнопкою мишки обрати **Global Definition** і додати **Variables**

🖛 🚽 🔳 🔹 📽 🕯	root)	.i≡+ 	
🗐 Global Defi	nition	-	
4 🧐 Componen	τPi	Parameters	
Definition Definition Definition	*a=	Variables	
Materia		Functions Geometry Subsequence	es +
i i i i i i i i i i i i i i i i i i i	+	Load Group	
	+1	Constraint Group	
		Group by Type	
	?	Help	F1

Рис.43 – Додання Variables у вкладці Model Builder

5. Щоб створити обертову трифазну систему струмів, необхідно додати наступні змінні:

** Name	Expression	Unit	Description
Ja	J1*cos(w*t)	A/m²	
Jb	J1*cos(w*t+2*pi/3)	A/m²	
Jc	J1*cos(w*t-2*pi/3)	A/m²	
J1	6e6[A/m^2]	A/m²	
t	1[s]	s	
f	50[Hz]	Hz	
w	2*pi*f*skovz	1/s	
skovz	0.045		

Рис.44 – Задання струмів у вкладці Variables

6. У вкладці Geometry1 додати Import:



Рис.45 – Додавання вкладки Import

7. Відкрити файл, створений раніше у САД-програмі

Import • +
讋 Build Selected 📳 Build All Objects
▼ Import
Geometry import:
Any importable file 🔹
Filename:
Browse Import
 Selections of Resulting Entities
Create selections
Contribute to: None New

Рис.46 – Імпортування геометрії з файла

Та імпортувати його, натиснувши кнопку Import

8. Розбити креслення на окремі елементи за допомогою доданої вкладки Ge-



1	
	(States of the

I активувати параметр Split кнопкою ON Active



Рис.47 – Імпортована геометрія з файла

Після цього клікнути на макет креслення в полі **Graphics** щоб додати його до вкладки **Input**.

Лівою кнопкою мишки клікнути на вкладку **Geometry1** та натиснути у вікні Geometry – **Build All (**або F8)

 Untitled.mph (root) Global Definitions Component 1 (comp1) E Definitions A Geometry 1 Morror 1 (imp1) Split 1 (spl1) Form Union (fin) Materials Magnetic Fields (mf) Mesh 1 Mesh 1 Magnetic Sields (mf) Mesh 1 Magnetic Fields (mf) Mesh 1 Mesh 1<th>Model Builder</th><th>Geometry • •</th>	Model Builder	Geometry • •
1E-6 Automatic rebuild	 Untitled.mph (root) Global Definitions Component 1 (comp1) E Definitions Geometry 1 Formort 1 (imp1) Split 1 (spl1) Form Union (fin) Materials Magnetic Fields (mf) Mesh 1 Results 	 Units Build All (F8) Scale values when changing units Length unit: m Angular unit: Degrees Advanced Default relative repair tolerance: 1E-6 Automatic rebuild

Рис.48 – Побудова всіх елементів у вкладці **Geometry1**

6. Використовуючи **Material library** у вкладці **Materials** додати матеріали: повітря і залізо. Мідь в обмотках задавати не треба, бо в даній задачі обмотки слугують як джерела поля і в них не досліджуються вихрові струми.

Для цього у вкладці	Materials	обрати	 Add Material	
		1		

Та у новому вікні додати Soft iron (without losses) та Air :



Рис.49 – Додавання матеріалів з бібліотеки матеріалів

7. Задати магнітну проникність заліза, µ=1000, клікнувши на Materials→

Soft Iron (without losses) (mat1, та обравши вікні Material відповідний параметр

**	Property	Name	Value
A	Relative permeability	mur	1000

Рис.50 – Задання µ матеріалу

Після цього – у вікні **Graphics** обрати блоки, що відповідають магнітопроводу асинхронного двигуна.

Клікнувши на вкладку ^В Кіг (mat2), обрати блоки, що відповідають області, з магнітною проникністю повітря (в тому числі – обмотки):

8. Задати трифазну систему струмів. Для цього, в вікні **Model Builder,** обрати **External Current Density**



Рис.51 – Задання зовнішніх джерел густин струму

Та створити для обмоток кожної фази свій параметр External Current Density (6 шт.), обравши відповідну область в вікні Graphics.

Вибрати потрібну поверхню та прописати по осі Z густини струмів, та слідкувати за знаком, так як для фази A береться зі знаком плюс, а для X – обираємо ту ж густину струму для фази A, але з мінусом.



Рис.52 – Задання зовнішніх джерел густин струму в фазних зонах обмотки статора

External Current Density
Domain Selection
Selection: Manual
20 25 26 9 •
Override and Contribution
 Coordinate System Selection
Coordinate system:
Global coordinate system
 External Current Density
External current density:
0 x
Je 0 y A/m Ja z
Рис.53 – Задання зовнішніх джерел густин струм

в фазних зонах обмотки статора

9. Додати Free Triangular у вкладці Mesh:



Рис.54 – Додання параметрів сітки Free Triangular у вкладці Mesh

10. Додати параметри **Time Dependent** у вкладці **Study1**, попередньо додавши **Study1** на панелі інструментів:

▲ 🐄 Stu ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲ ▲	dv.1 = C	Compute Update Solution	F8 F5			
	+	Parametric Sweep Optimization		-		35
		Study Steps	•	Stationary	•	30
	Dr.	Show Default Solver		Time Dependent		* 🖳 Time Dependent
	U t=o	Get Initial Value		Eigenfrequency	•	* 🕰 Time Discrete

Рис.6 – Задання параметрів **Time Dependent** у вкладці **Study1**

Також – виставити необхідні параметри для **Time Dependent** у відповідному вікні.

Time Dep	pendent	▼ ‡
▼ Study Sett	ings	
Time unit:	5	•
Times:	range(0,0.0002,0.02) s	
Relative toleran	ce: 🔲 0.01	

Рис.55 – Задання параметрів Time Dependent у вкладці Study1

Compute

11. На панелі інструментів розрахувати процес, обравши «Compute»

12. У вікні **Model Builder** додати **Contour1**, натиснувши правою кнопкою мишки на **Magnetic flux density**:



Рис.56 – Додавання вкладки Contour1 у вкладці Magnetic flux density

Записати у вкладці Surface для відтворення силових ліній магнітного потоку:

Surface	-
Plot	
▼ Data	
Data set: From parent	•
 Expression 	+ • 🛓 •
Expression:	
mf.normB	
Unit:	
Т	•

Рис.57 – Задання параметрів у вкладці **Surface**

Та у вкладці **Contour** записати:

Contour
0 Plot
 Data
Data set: From parent
🗸 Expression 🛛 🕂 🕇 🕇 🕇
Expression:
Az
Jnit:
Wb/m 🔻

Рис.58 – Задання параметрів у вкладці **Contour**

Для виводу результатів, додати необхідні параметри, як показано у прикладі і натиснути **Plot**.

13. Для експорту анімації фізичного процесу, що відображається в часовій зміні розподілу магнітного поля і індукції в активних частинах асинхронного двигуна необхідно у вкладці «**Export**» додати **Animation** та натиснути «**Export**»



Рис.59 – Додавання вкладки Animation

Можна ввести корективи у вкладці «Animation» у відповідності з налаштуваннями якості, кількості кадрів, та роздільної здатності:

Animation C Refresh 🕞 Expo				
▼ Scene				
Subject: Magnetic Flux Density Norm (mf) 🔹				
▼ Output				
Output type:	Movie 🔹			
Format:	▼ IVA	Lock aspect ratio		
Filename:	C:\Users\K32\Deskte Browse	Width:	1280	р×
Quality:	1	Height:	720	р×
Frames per second:	30	Record in reverse	order	
 Animation Editing 		▼ Layout		
Sequence type: Stored solutions		📃 Include 👘		
Loop over: Time		Title		
Time selection: All		Axes		
▼ Frames		📝 Logotype		
Frame selection:	Number of frames 🔹	Font size: 9		pt
Number of frames:	150	Background: Curre	ent 🔹	
Size:	Manual 🔹	Advanced		

Рис.60 – Параметри вкладки Animation

Натиснути «Export» для отримання результату у вигляді відео.

14. Щоб додати в результати відображення струмів (**Current density, z component(mf.Jz**) потрібно:

Скопіювати вкладку Magnetic Flux Density Norm натиснувши вкладку Duplicate:

🔺 📠 Results		MOVEDOWN	Cui+Down
Data Sets	Þ	Duplicate	
^{8.45} Derived Val	×	Delete	Del
 Magnetic F 	0	Disable	F3
Surface	×	Rename	F2

Рис.61 – Дублювання вкладки Current density, z component (mf.Jz)

У вікні Surface справа Expression додати (Current density, z component(mf.Jz):



Рис.62 – Задання формули Current density, z component (mf.Jz)

15. Щоб додати в результати відображення розподілу ліній векторного магнітного потенціалу необхідно:

Скопіювати вкладку Current density, z component нажавши Duplicate:

Data Sets		more bown	cur, pown
8-85 Derived Va	Ð	Duplicate	
🔺 📠 Magnetic F	×	Delete	Del
Surface	0	Disable	F3
▲ Weill Current de Surface	×	Rename	F2

Рис.63 – Дублювання вкладки Current density, z component (mf.Jz)

Натиснувши Magnetic flux density вибрати Contour:

L			
	•9	Contour	
odel Bui	*≫	Streamline	
→ ≣ -	+⊐;	Arrow Line	
🔇 ЛАБА 4 Го	* sč	Particle Trajectories	
🔺 🗐 Globa		-	
	+ 🛣	Mesh	
a= Va	_	Wiesh	
🕨 🔍 Comp		NA DI I	
1 000 CL 1		More Plots	
I ™ Study			
🔼 Ste	*	Add Image to Export	
N 🔤 Sa			
_ [- 30	+	Move Un	Ctrl+Ur
🔺 💻 Result	1.1	move op	Curr of
		Duplicate	
V :::: ∪d		Duplicate	
ê-12 De	1 V I	Delete	Del
🎹 та	\sim	Delete	Dei
	0	Disable	53
🔺 🔍 Mi	0	Disable	F5
		D	50
	~	Kename	FZ
🔺 💻 Ci	_		
		B	

Рис.64 – Додавання вкладки Contour

Settings • F Contour Plot				
Label: Contour 1				
▼ Data				
Data set: From parent				
✓ Expression				
Expression:				
Az				
Unit:				
Wb/m ~				
Description:				
Magnetic vector potential, z component				
> Title				
▼ Levels				
Entry method: Number of levels ~				
Total levels: 20				
Coloring and Style				
Contour type: Line ~				
Level labels				
Coloring: Color table ~				
Color table: Rainbow ~				
Color legend 🗸				

Рис.65 – Задання параметрів у вкладці Contour

У вікні Contour справа натиснути Expression і додати (Magnetic vector potential, z component (Az)):

✓ Expression + ✓	4 • 1900			
Expression:	Type filter text			
mf.Az	 Magnetic Fields 			
Unit:	 Currents and charge Electric 			
Wb/m	 Energy and power Global Heating and losses 			
Description:				
Magnetic vector potential, z component	✓ Magnetic			
▷ Title	 Magnetic field Magnetic field norm (mf.normH) 			
Range	Magnetic flux density Magnetic flux density norm (mf normP)			
 Coloring and Style 	 Magnetic vector potential 			
Color table	 Magnetic vector potential Magnetic vector potential, x component (mf.Ax) Magnetic vector potential, y component (mf.Ay) 			
	Magnetic vector potential, z component (mf.Az)			

Рис.66 – Задання формули Magnetic vector potential, z component (Az)

Змінити назву Magnetic flux density на Magnetic vector potential, z component поставивши галочку в Description.



16. Для розрахунку моделі натиснути На панелі інструментів Сомрите

Вивід результатів робиться аналогічно до алгоритму процесу моделювання трифазного трансформатора.

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока / А.И. Важнов. Л.: Энергия, 1980. 256 с.
- Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії: навч. посіб. / Ю.М. Васьковський. – К.: НТУУ "КПІ", 2003. – 161 с.
- 3. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: навч. посіб. / Ю.М. Васьковський. К.: НТУУ "КПІ", 2007. 192 с.
- 4. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
- 5. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. М.: Госэнергоиздат, 1950. 551 с.
- 6. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е.Я. Казовский. Л.: Изд. АН СССР, 1962. 626 с.
- 7. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 744 с.
- 8. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: учеб. / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 1987. – 248 с.
- Переходные процессы в электрических машинах и аппаратах и вопросы их проектирования: учеб. пособ. / [О.Б. Буль, И.С. Свириденко, С.П. Хелемская]; под ред. О.Д. Гольдберга. – М.: Высш. школа, 2001. – 512 с.
- 10. Постников И.М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин: учеб. – [2-е изд.] / И.М. Постников. – М.: Высш. школа, 1975. – 319 с.
- 11. Сенигов П.Н. Переходные процессы в синхронных машинах: учеб. пособ. / П.Н. Сенигов. – Челябинск: ЧГТУ, 1993. – 44 с.

додаток

Перелік інформації, що необхідно представити в протоколах:

1. До Комп'ютерного практикуму №1 (Частина 1) (Дослідження впливу параметрів короткозамкненого асинхронного двигуна на пускові характеристики):

- 1. Мета роботи, програма роботи;
- 2. Дані згідно варіанту
- 3. Скрін програми з даними згідно варіанту
- 4. Рисунки з розрахунком 4-х графіків для номінальних даних в координатах α, β.
- 5. Рисунки з розрахунком 4-х графіків для номінальних даних в координатах u, v.
- 6. Таблички з підписами 7 штук
- 7. Графіки в Excel 7 штук
- 8. Висновки.

2. До **Комп'ютерного практикуму №1(Частина 2)** (Математичне моделювання та дослідження пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором при несиметричній напрузі живлення в програмі MatLab – Simulink):

- 1. Мета роботи, програма роботи;
- 2. Схема в Simulink
- 3. Рисунки з параметрів (властивостей) блоків в схемі у відповідності з варіантом.
- 4. Рисунки зі Scope 4 штуки:
 - о струмів фаз обмотки статора *I*₁;
 - о струмів фаз обмотки ротора *I*₂;
 - о електромагнітний момент *М*;
 - о швидкість обертання ротора *n*;
 - о напруга мережі *U*.
- 5. Для кожного з коефіцієнтів (k_A, k_{Φ}, k_3) необхідно навести:

Формула, таблиця ($I_{v\partial}^*$, $M_{v\partial}^*$ і t_P), графік в Excel. Все це підписати.

6. Висновки.

3. До **Комп'ютерного практикуму №2** (Математичне моделювання та дослідження перехідних процесів в синхронному генераторі):

- 1. Мета роботи, програма роботи;
- 2. Дані згідно варіанту
- 3. Схема в Simulink
- 4. Таблички з підписами 8 штук (I_1 , M_{e_M} , θ , U_a , i_s , U_s , n, ...)
- 5. Графіки в Excel 8 штук (I_1 , M_{e_M} , θ , U_a , i_e , U_e , n, ...)
- 6. Таблички з підписами 2 штук (x_d , x_d'')
- 7. Графіки в Excel 2 штук (x_d , x''_d)
- 8. Висновки.

4. До **Комп'ютерного практикуму №3** (Математичне моделювання електромагнітних полів в електромеханічних перетворювачах енергії в програмі Comsol Multiphysics):

- 1. Мета роботи, програма роботи;
- 2. Дані трансформатора
- 3. Скрін трансформатора в програмі Comsol (можна ч/б):
 - а. Розподіл індукції і ізоліній магнітного поля
 - b. Розподіл струмів в обмотках і ізоліній магнітного поля
- 4. Дані асинхронного двигуна
- 5. Скрін асинхронного двигуна в програмі Comsol (можна ч/б):
 - а. Розподіл індукції і ізоліній магнітного поля
 - b. Розподіл струмів в обмотках і ізоліній магнітного поля
- 6. Висновки.