

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Наумов Олег Євгенович

УДК 621.313.3

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ
НА ОСНОВІ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Спеціальність 05.09.01 – Електричні машини і апарати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» МОН України, м. Донецьк.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Ларін Аркадій Михайлович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» МОН України, доцент кафедри електричних систем, м. Донецьк.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Луцик В'ячеслав Данилович,
Донбаський державний технічний університет, професор кафедри електричних машин і апаратів, м. Алчевськ;

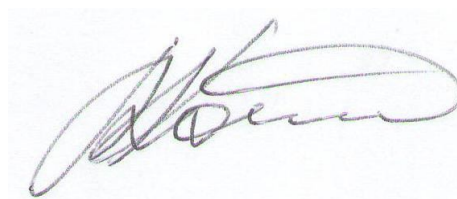
кандидат технічних наук
Ткаченко Андрій Олександрович,
Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації, м. Краматорськ.

Захист відбудеться “20” березня 2014 р. о 13¹⁵ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.02 у ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 8-й навчальний корпус, ауд. 8.514.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розісланий “ ____ ” лютого 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 11.052.02, д. т. н., професор



В.П. Кондрахін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Поглиблене вивчення поведінки електричних машин (ЕМ) в динамічних режимах є одним з найбільш важливих факторів, що визначають їх надійну та ефективну роботу. Тому вимоги до точності та глибини аналізу перехідних процесів, що мають місце в синхронних (СМ) та асинхронних (АМ) машинах під час аварійних режимів, невинно зростають. У світовій практиці визнано, що одним з найпрогресивніших шляхів достовірного передбачення поведінки ЕМ у перехідних режимах є використання математичних моделей, які адекватно відображають реальні фізичні процеси.

Математичні моделі повинні враховувати наявність довільної кількості контурів на роторі, залежність параметрів від частоти струмів, а також вплив насичення шляхів магнітних потоків.

Моделювання перехідних процесів в ЕМ на основі диференціальних рівнянь, яке у теперішній час є поширеним для аналізу симетричних режимів, пов'язане із певними труднощами під час дослідження несиметричних режимів. Аналіз процесів в системах, що містять групу електричних машин, потребує значного обсягу обчислень внаслідок збільшення порядку системи рівнянь, і в ряді випадків виникає проблема забезпечення стійкості обчислювального процесу.

Застосування частотних характеристик (ЧХ), або струмових діаграм, дозволяє виконувати дослідження динамічних режимів на основі аналітичного опису процесів з урахуванням зазначених факторів, навіть без знання структури внутрішніх зв'язків окремих елементів машини між собою. В умовах, коли така структура не визначена, даний підхід може бути найбільш ефективним. Для розрахунку перехідних процесів при симетричних збуреннях режиму частотний метод достатньо теоретично обґрунтований і розроблені відповідні математичні моделі. Однак для аналізу несиметричних режимів та багатомашинних систем частотний метод дослідження практично не застосовується, оскільки не розроблені відповідні математичні моделі.

З іншого боку відомо, що будь-яка математична модель забезпечує необхідну точність розрахунків тільки при належному визначенні її параметрів. Розроблено багато способів експериментального визначення сукупності електромагнітних параметрів машин змінного струму, які, як правило, потребують додаткового спеціального обладнання або складних алгоритмів розрахунку, що викликає труднощі їх застосування в умовах експлуатації.

Таким чином, задача удосконалення методів аналізу несиметричних перехідних режимів та ідентифікації електромагнітних параметрів ЕМ на основі частотних характеристик є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота безпосередньо пов'язана з науковою тематикою кафедри електричних систем ДВНЗ «ДонНТУ». Дослідження, результати яких наведені в дисертації, пов'язані з виконанням НДР: Д-8-03 – «Розвиток теорії моделювання електричних машин змінного струму під час аномальних режимів в енергосистемі» (№ ДР 0103U001324) та Н-17-05 – «Удосконалення математичного, інформаційного та

програмного забезпечення систем керування і діагностики електроенергетичних об'єктів».

Мета роботи. Удосконалення математичних моделей електричних машин змінного струму, які ґрунтуються на експериментальних частотних характеристиках, для аналітичного дослідження перехідних процесів при виникненні несиметрії у колі обмотки статора, аналізу багатомашинних систем, а також експериментального визначення електромагнітних параметрів.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

1. Уточнення математичних співвідношень, які характеризують зв'язок між частотними характеристиками провідності електричних машин змінного струму і складовими струму статора і контурів ротора динамічного режиму при виникненні несиметрії у колі обмотки статора.

2. Створення математичних моделей синхронних і асинхронних машин, які дозволяють аналітично досліджувати перехідні процеси з урахуванням наявності довільної кількості контурів у роторі при несиметричних коротких замиканнях або неповнофазних ввімкненнях у мережу.

3. Розробка методу експериментального визначення частотних характеристик по параметрах перехідного процесу, що викликаний ввімкненням нерухомої електричної машини на джерело однофазної напруги промислової частоти.

4. Розробка методів еквівалентування і перетворення багатомашинних вузлів з асинхронними або синхронними машинами, які ґрунтуються на адекватності частотних характеристик провідностей або опорів, для спрощення математичного моделювання електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів.

5. Оцінка ефективності запропонованих в роботі математичних моделей і методів.

Об'єкт дослідження – перехідні процеси в синхронних та асинхронних машинах при симетричних або несиметричних збуреннях з боку обмотки статора.

Предмет дослідження – сукупність електромагнітних параметрів, що визначають поведінку електричних машин в симетричних і несиметричних перехідних режимах.

Методи дослідження. Зв'язок між перехідними процесами в електричних машинах та їх частотними характеристиками встановлювався на основі методів, що базуються на теорії комплексно-операторного опису перехідних процесів, і методів математичного аналізу, які засновані на властивостях перетворення Лапласа та інтеграла Фур'є. Дослідження несиметричних режимів проводилося із використанням методу симетричних складових. Оцінка ефективності і достовірності результатів, які отримані в роботі, здійснювалась шляхом зіставлення результатів розрахунків за запропонованими методиками із даними дослідів на діючому обладнанні, а також результатами розрахунків перехідних процесів із використанням відомих апробованих моделей.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Отримані математичні співвідношення, що встановлюють зв'язок між

частотними характеристиками провідності асинхронних і синхронних машин та складовими прямої і оберненої послідовності струму статора і контурів ротора динамічного режиму, які виникають при появі несиметрії у колі обмотки статора.

2. Отримали подальший розвиток математичні моделі машин змінного струму, основані на частотних характеристиках, які дозволяють, на відміну від існуючих підходів, аналітично досліджувати перехідні процеси при несиметричних коротких замиканнях або неповнофазних включеннях в мережу.

3. Запропонований новий метод експериментального визначення частотних характеристик за параметрами перехідного процесу, що викликаний ввімкненням нерухомої електричної машини на джерело однофазної напруги промислової частоти.

4. Запропонований новий підхід до еквівалентування синхронних генераторів та асинхронних двигунів під час дослідження електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів у багатомашинних системах, який відрізняється тим, що дозволяє спростити математичну модель системи без зниження точності відображення динамічних властивостей кожної електричної машини.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено методики експериментального визначення частотних характеристик по осях магнітної симетрії ротора синхронних та асинхронних машин за даними дослідів ввімкнення їх в нерухомому стані на однофазне джерело напруги промислової частоти. Створено відповідне програмне забезпечення для автоматизованої обробки результатів дослідів і визначення сукупності електромагнітних параметрів у вигляді частотних характеристик, або еквівалентних заступних схем.

2. Розроблені алгоритми і створений комплекс програм у середовищі математичного пакету MathCAD, який дозволяє розраховувати перехідні процеси в електричних машинах при несиметричних коротких замиканнях або неповнофазних включеннях в мережу, а також динамічні режими у багатомашинних системах при симетричних збуреннях у колі обмоток статора (короткі замикання, пуски і самозапуски асинхронних двигунів).

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики експериментального визначення частотних характеристик асинхронних машин прийняті до використання у відділі електричних машин Українського науково-дослідницького проектно-конструкторського і технологічного інституту вибухозахищеного і рудничного електрообладнання УкрНДІВЕ, для визначення електромагнітних параметрів і характеристик асинхронних двигунів.

Зазначена методика також може бути використана для визначення електромагнітних параметрів асинхронних машин в умовах експлуатації і на випробувальних стендах електромашинобудівних заводів.

Отримані в роботі математичні моделі і методики розрахунку рекомендується використовувати в проектно-конструкторських організаціях, на підприємствах і в НДІ для аналізу перехідних процесів при симетричних та несиметричних коротких замиканнях, пусках і самозапущах асинхронних

двигунів. Результати роботи також впроваджені в навчальний процес ДВНЗ «ДонНТУ».

Особистий внесок здобувача: отримані математичні співвідношення, які дозволяють аналітично описувати електромагнітні перехідні процеси при моделюванні несиметричних режимів електричних машин; запропонований метод експериментального визначення частотних характеристик асинхронних і синхронних машин за даними дослідів включення в мережу на дві фази; запропонований спосіб еквівалентування багатомашинних систем.

Апробація результатів дисертації. Результати виконаних в дисертації досліджень доповідалися та обговорювалися на: II Міжнародній науково-технічній конференції аспірантів і студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих» (25-26 квітня 2002 р., м. Донецьк); Міжнародному симпозиумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика (SIEMA'2004)» (14-16 жовтня 2004 р., м. Харків); семінарі Наукової ради НАН України по комплексній проблемі «Наукові основи електроенергетики» (2006 р., 2010-2011рр., м. Донецьк); 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційна техніка і електромеханіка (ІТЕМ-2007)» (17-19 квітня 2007 р., м. Луганськ).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 6 наукових робіт, з яких 4 – у фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого МОН України, в тому числі: 1 – в наукових журналах, 3 – у збірниках наукових праць; 1 – у закордонному науковому журналі англійською мовою; 1 – в тезах конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг складає 165 сторінок друкованого тексту; робота містить 72 рисунка, 9 таблиць, перелік використаних літературних джерел із 119 найменувань на 14 сторінках; 1 додаток на 2 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Стан питань моделювання перехідних процесів та ідентифікації параметрів машин змінного струму» наведений огляд існуючих методів розрахунку перехідних режимів і визначення параметрів синхронних і асинхронних машин.

У галузі ідентифікації електромагнітних параметрів електричних машин змінного струму проведені значні дослідження, які відображені у працях Казовського Є.Я., Данілевича Я.Б., Лютера Р.А., Важнова А.І., Маміконянца Л.Г., Сідельникова А.В., Постнікова І.М., Шумілова Ю.А., Чабана В.І., Рогозіна Г.Г., Сивокобиленка В.Ф., Родькіна Д.Й.; Чорного О.П і багатьох інших.

Моделювання перехідних режимів ЕМ змінного струму може виконуватися чисельно-польовими методами, на основі диференційних рівнянь машини, а також шляхом використання функціональних характеристик, що дозволяє виконувати аналіз таких процесів без знання структури і параметрів заступних схем машин. Розглянуті запропоновані в літературі методики розрахунку

електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів у багатомашинних системах. Показано, що вони мають ряд суттєвих обмежень.

Необхідну простоту, точність і наочність моделювання перехідних процесів ЕМ забезпечує використання частотного методу. Однак питання застосування частотного методу до аналізу електромагнітних перехідних процесів при несиметричних режимах, стосовно дослідження багатомашинних систем, а також розрахунку струмів в роторних контурах при змінній швидкості обертання розроблені недостатньо.

Сформульовані задачі дисертаційної роботи.

У другому розділі «Розробка математичних моделей електричних машин, що побудовані на основі частотних характеристик, для дослідження перехідних процесів при порушенні симетрії» встановлюється математичний зв'язок між частотними характеристиками провідності асинхронних і синхронних машин та складовими оберненої послідовності (ОП) струму статора і контурів ротора, що виникають при появі несиметрії у колі обмотки статора.

При ввімкненні обмотки статора на джерело напруги оберненої послідовності при незмінному ковзанні s_0 , результуючий струм, який обумовлений дією напруги оберненої послідовності, можливо представити як додатак усталеного i_{02} , аперіодичного i_{12} , обумовленого обмоткою статора, і перехідного i_{22} , обумовленого аперіодичними складовими струму ротора. Без урахування активного опору статора вектор усталеного струму ОП у початковий момент часу знаходиться за частотною характеристикою для ковзання $2 - s_0$:

$$\dot{I}_{02(t=0)} = y(js)_{s=2-s_0} \cdot \quad (1)$$

Аперіодична складова \dot{I}_{12} за ЧХ $y(js)$ при ковзанні $-(1-s_0)$:

$$\dot{I}_{12(t=0)} = -y(js)_{s=-(1-s_0)} \cdot \quad (2)$$

Початкове значення перехідного струму $\dot{I}_{22(t=0)}$ знаходиться за умови рівності нулю загального струму статора у початковий момент часу:

$$\dot{I}_{22(t=0)} = -\dot{I}_{02(t=0)} - \dot{I}_{12(t=0)} = \sum_{k=1}^N \dot{I}_{22k} \cdot \quad (3)$$

З (3) із урахуванням (1) і (2) витікає, що окремі складові цього струму визначаються через параметри заступної схеми (рис.1) наступним чином:

$$\dot{I}_{22k} = y_k(js)_{s=-(1-s_0)} - y_k(js)_{s=2-s_0} = \frac{j r_k (2s_0 - 3)}{(j x_k (s_0 - 1) + r_k)(j x_k (2 - s_0) + r_k)} \cdot \quad (4)$$

Закон змінення зображуючого часового вектора струму статора ОП у нерухомих координатних вісях статора описується наступною формулою:

$$\dot{i}_2(t) = U_2 \cdot e^{j\gamma_0} \cdot \left(\dot{I}_{02(t=0)} \cdot e^{j\omega \cdot t} + \dot{I}_{12(t=0)} e^{j\omega_a \omega \cdot t} \cdot e^{-t/T_a} + \sum_{k=1}^N \dot{I}_{22k} \cdot e^{-t/T_k} \cdot e^{j(1-s_0) \cdot \omega \cdot t} \right), \quad (5)$$

де U_2 - величина напруги оберненої послідовності; γ_0 - фаза включення;

$$\omega_a = \text{Im}[y_r(js)_{s=-(1-s_0)}] \cdot r_s; \quad T_a = \frac{1}{\text{Re}[y_r(js)_{s=-(1-s_0)}] \cdot r_s \cdot \omega} \cdot$$

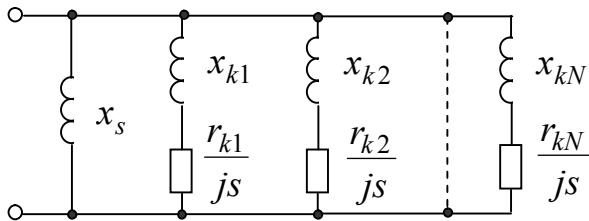


Рисунок 1 – Заступна схема електричної машини

Миттєві значення фазових струмів ОП знаходяться як проекції цього вектора на фазні вісі, чередування яких повинно бути зворотним (А, С, В).

Повні фазові струми статора при включенні з несиметричною по фазах напругою мережі (з урахуванням складових прямої послідовності) можуть бути визначені через єдиний просторовий

вектор $\dot{i}_s(t)$:

$$\dot{i}_s(t) = \dot{i}_{s1}(t) + \dot{i}_{s2}(t)e^{j\gamma_U} = \dot{i}_1(t) + \dot{i}_2^*(t)e^{j\gamma_U}, \quad (6)$$

де γ_U - кут між векторами напруги прямої та оберненої послідовності;

$\dot{i}_s(t) = \dot{i}_2^*$ - просторовий вектор ОП.

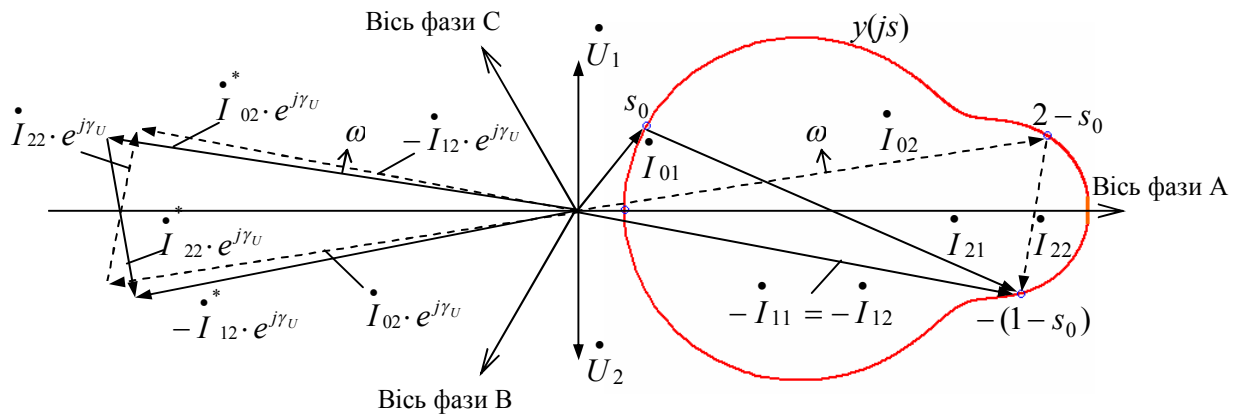


Рисунок 2 – Визначення складових просторового вектора струму статора асинхронної машини

Графічні побудови для визначення узагальненого просторового вектора для випадку, коли $\dot{U}_1 = -\dot{U}_2$, показані на рис. 2.

Перехідний струм ротора при ввімкненні асинхронної машини в мережу з несиметричною напругою визначається за тими ж частотними характеристиками провідності, що і струм статора, оскільки ЧХ є геометричним місцем як струмів статора, так і струмів ротора. Узагальнений вектор струму ротора при включенні АМ на напругу оберненої послідовності визначається за виразом:

$$\dot{i}_{r2}(t) = U_2 \cdot e^{j\gamma_U} \frac{x_s}{x_\mu} \cdot \left(\left(\dot{I}_{02(t=0)} - \dot{I}_{XX} \right) e^{-j\omega \cdot (2-s_0)t} + \sum_{k=1}^N \dot{I}_{22k} e^{-\frac{t}{T_k}} + \dot{I}_{rn2(t=0)} \cdot e^{j\omega(s_0 + \omega_a - 1)t} e^{-\frac{t}{T_a}} \right). \quad (7)$$

При урахуванні впливу активного опору обмотки статора r_s , вектори складових струму необхідно визначати за частотними характеристиками провідностей, які розраховані з урахуванням активного опору статора

$(y_r(js) = \frac{j}{r_s + jx(js)})$ аналогічно тому, як вони визначалися без урахування цього опору. При цьому мають бути уточненими значення ω_a і T_a .

Для випадку ввімкнення синхронної машини на напругу оберненої послідовності розрахунок струму статора відрізняється використанням окремих ЧХ $y_d(js)$ і $y_q(js)$ по осях симетрії ротора. На рис. 3 показано визначення початкових значень усталеного $\dot{i}_{02}(t)$ і аперіодичного $\dot{i}_{12}(t)$ струму статора, що визначаються наступними співвідношеннями:

$$\dot{i}_{02}(t) = (\dot{I}_{02cp(t=0)} + \Delta \dot{I}_{02(t=0)} \cdot e^{-j2(2-s_0)\omega \cdot t}) \cdot e^{-j\omega t}; \quad (8)$$

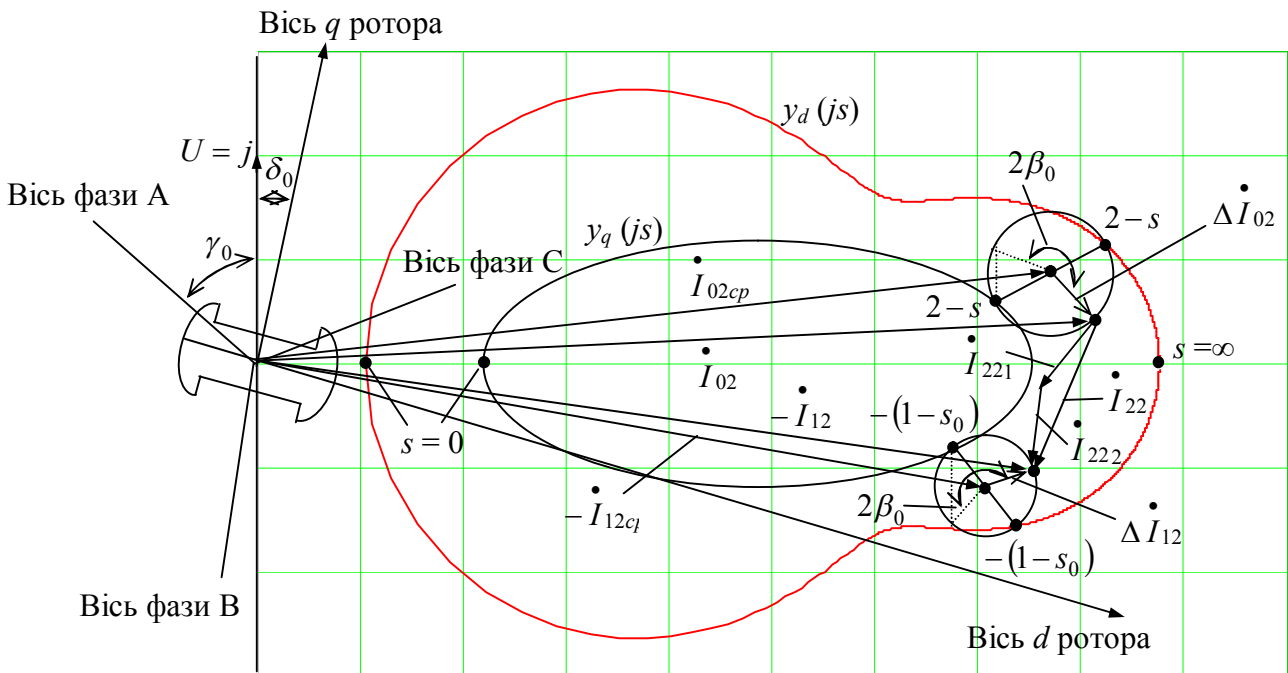


Рисунок 3 – Визначення початкових значень перехідних струмів статора СМ при її ввімкненні на напругу оберненої послідовності

$$\dot{i}_{12}(t) = -(\dot{I}_{12cp(t=0)} \cdot e^{j\omega_a \cdot t} + \Delta \dot{I}_{12(t=0)} \cdot e^{-j2(1-s_0-\omega_a)\omega \cdot t}) \cdot e^{-t/T_a}, \quad (9)$$

де \dot{I}_{02cp} і \dot{I}_{12cp} - середні значення, $\Delta \dot{I}_{02}$ і $\Delta \dot{I}_{12}$ - різніскі складові усталеного і аперіодичного струму відповідно; $y_{cp}(js) = \frac{y_d(js) + y_q(js)}{2}$; $\Delta y(js) = \frac{y_d(js) - y_q(js)}{2}$.

Початкове значення $\dot{I}_{22(t=0)}$ перехідного струму $\dot{i}_{22}(t)$ визначається, як і для асинхронної машини, у відповідності до виразу (3).

Окремі складові вектора перехідного струму синхронної машини $\dot{I}_{22(t=0)}$ розраховуються за (4) із використанням параметрів $r_{d(q)k}$, $x_{d(q)k}$ роторних контурів заступних схем (рис. 1), що відповідають ЧХ по вісям d $y_d(js)$ і q $y_q(js)$.

Закон змінення перехідної складової струму статора ОП має вигляд:

$$\dot{i}_{22}(t) = \left(\sum_{k=1}^N I_{22dk} \cdot e^{-\frac{t}{T_{dk}}} + j \sum_{m=1}^M I_{22qm} \cdot e^{-\frac{t}{T_{qm}}} \right) \cdot e^{j\omega(1-s_0)t}, \quad (10)$$

де N и M - кількість роторних контурів в заступних схемах по поздовжній і поперечній вісям відповідно.

Сумарний струм оберненої послідовності статора при заданій величині напруги U_2 описується виразом:

$$\dot{i}_2(t) = U_2 \cdot e^{j\gamma_0} \cdot \left(\dot{i}_{02}(t) + \dot{i}_{12}(t) + \dot{i}_{22}(t) \right). \quad (11)$$

Розрахунок струму в обмотці збудження синхронної машини в несиметричних режимах базується на використанні ЧХ коефіцієнтів розподілу симетричних складових струму статора у колі обмотки збудження. Для прямої послідовності цей коефіцієнт визначається за виразом

$$C_{f1}(js) = \frac{\frac{js}{r_f + jsx_{\sigma f}}}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{js}{r_f + jsx_{\sigma f}} + \sum_{n=1}^N \frac{js}{r_{kd_n} + jsx_{kd_n}}}, \quad (12)$$

а ЧХ $i_{f1}(js)$ провідності обмотки збудження за формулою

$$i_{f1}(js) = C_{f1}(js) \cdot y_d(js). \quad (13)$$

Для оберненої послідовності відповідні коефіцієнти $C_{f2}(js)$ і $i_{f2}(js)$ розраховуються за (12)-(13) при підстановці замість s величини $2-s$. За ЧХ $i_{f1}(js)$ і $i_{f2}(js)$ синтезуються еквівалентні заступні схеми виду рис. 1 для переходу з частотної у часову область.

Усталений струм оберненої послідовності визначається за формулою:

$$\dot{i}_{f2y}(t) = C_{f2}(js)_{s=s_0} \cdot y_d(j(2-s))_{s=s_0} \cdot e^{-j(2-s_0)\omega t}. \quad (14)$$

Аперіодичний струм ОП:

$$\dot{i}_{f2a}(t) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{x_{fk}} \cdot e^{-\frac{t}{T_{fk}}}, \quad (15)$$

де $T_{fk} = \frac{x_{fk}}{\omega \cdot r_{fk}}$ - постійні часу контурів у схемі виду рис. 1, яка синтезована за частотною характеристикою $i_{f2}(js)$.

З урахуванням періодичної $\dot{i}_{f1n}(t)$ і аперіодичної $\dot{i}_{f1a}(t)$ складових прямої послідовності, визначення яких частотним способом було представлено в літературі, повний струм ОВ в несиметричному режимі розраховується за виразом:

$$\dot{i}_f(t) = i_{f0} + \dot{i}_{f1n}(t) + \dot{i}_{f1a}(t) + \dot{i}_{f2y}(t) + \dot{i}_{f2a}(t). \quad (16)$$

Для моделювання електромеханічних перехідних процесів, які супроводжуються зміненням швидкості обертання ротора, одержані рівняння для струмів доповнювались рівнянням механічного руху ротора. В останньому

використовувались моменти і потокозчеплення прямої та оберненої послідовності машини. Розрахунок перехідних процесів виконується методом послідовних інтервалів з перерахунком на кожному кроці всіх величин, які залежать від ковзання ротора. Розроблені алгоритми розрахунку електромеханічних перехідних процесів при включенні АМ і СМ на джерело несиметричної напруги.

При неповнофазних режимах і двофазних коротких замиканнях ізольованої від мережі машини величини напруг окремих послідовностей є функціями часу. Моделювання таких режимів запропоновано виконувати на основі комплексних заступних схем, що складаються із заступних схем ЕМ прямої та оберненої послідовностей. За комплексними схемами визначаються частотні характеристики і синтезуються еквівалентні заступні схеми для розрахунку частотним методом або за диференційними рівняннями електричної машини.

Модуль ЧХ опору оберненої послідовності машини $z_2(js)$ практично залишається постійним при змінненні ковзання від 1 до 0. Це дозволяє використовувати в розрахунках дискретне значення опору, що визначається для ковзання $s = 2$. Синхронна машина повинна представлятися комплексними заступними схемами по кожній з вісей симетрії ротора. У протилежному випадку похибка розрахунку може сягати 20% і більше.

У третьому розділі «Аналіз похибок моделювання перехідних процесів в електричних машинах при порушенні симетрії напруг в мережі живлення» виконана оцінка ступеня достовірності розроблених математичних моделей ЕМ шляхом співставлення результатів розрахунку деяких перехідних процесів з експериментальними даними, а також з відповідними результатами, які отримані за апробованими програмами, які реалізують чисельне інтегрування диференційних рівнянь.

• Для асинхронного двигуна 4А90L4У3 ($P_{ном} = 2,2$ кВт; $U_{ном} = 380$ В) аналізувались перехідні процеси при включенні в трифазну мережу, яка мала різні ступені несиметрії напруги, при різних ковзаннях. У якості прикладу, на рис.4 наведені залежності струму статора (фаза А) та зображуючого вектора струму ротора для випадку $s = 0$ і несиметрії виду $U_{A1} = 0,9U_{ном}$, $U_{A2} = 0,1U_{ном}$, $\gamma_U = 0^\circ$. З рис. 4 слідує, що отримані різними способами залежності практично співпадають між собою. Амплітудні значення струму статора відрізняються не більше ніж на 1,38%.

• Моделювання електромеханічних перехідних процесів

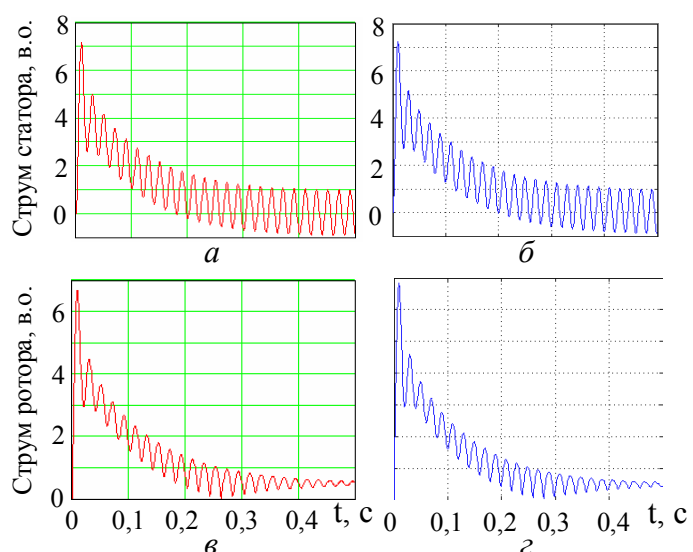


Рисунок 4 – Залежності струмів двигуна 4А90L4У3: а, в – розрахунок за методикою, що пропонується; б, г – результати моделювання в MatLAB

виконувалось на прикладі пуску цього ж двигуна від мережі із наступними фазовими напругами: $U_A = U_{ном}$, $U_B = 0,854 \cdot U_{ном} \cdot e^{-j125,82^\circ}$, $U_C = 0,854 \cdot U_{ном} \cdot e^{j125,82^\circ}$. Зіставлення результатів розрахунку за запропонованою методикою із даними моделювання з використанням прикладного пакету MatLAB показало, що тривалість пуску в обох випадках практично співпала. Відмінність максимальних значень модуля узагальненого вектора струму статора склала 0,8%, а струму ротора – 0,9%. Похибка у визначенні електромагнітного моменту не перевищила 4,4%.

- Аналіз несиметричних режимів на основі комплексних заступних схем проводилася для випадку включення на дві фази двигуна 4A90L4УЗ, що обертається із синхронною швидкістю. На рис. 5 представлені залежності змінення фазових струмів статора та зображуючого вектора струму ротора.

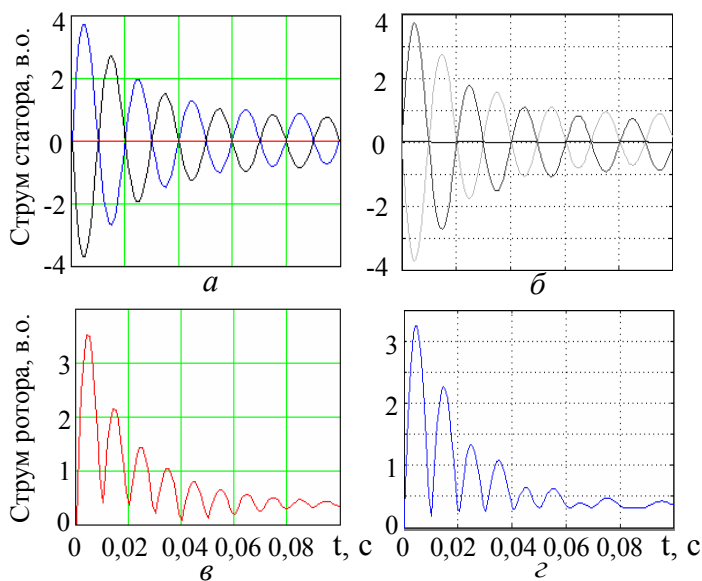


Рисунок 5 - Залежності струмів двигуна 4A90L4УЗ при включенні в мережу на дві фази:
а, в – розрахунок за методикою, що пропонується;
б, г – результати моделювання в MatLAB

Похибки результатів, що отримані для різних моделей (відмінність струмів статора складає 0,5%, а ротора не перевищує 7,1%), свідчать про ефективність застосування запропонованої методики до аналізу неповнофазних режимів асинхронних машин.

- Для турбогенератора типу Т-4376/142 був виконаний розрахунок електромагнітних перехідних процесів при двофазному КЗ на виводах ізолюваної від мережі машини. На рис. 6 наведені залежності струму статора (фаза В) і обмотки збудження, що отримані за

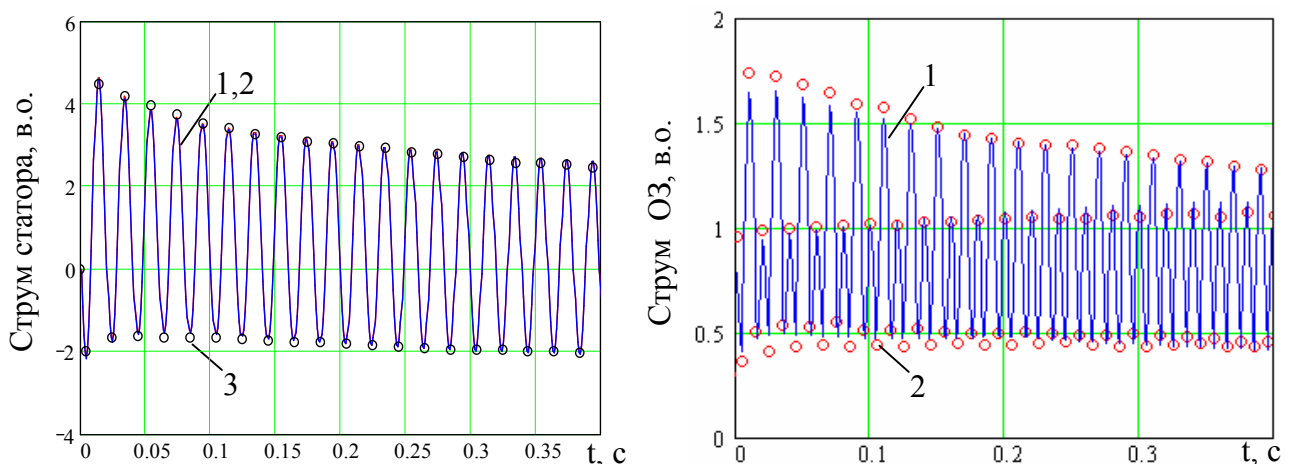


Рисунок 6 – Залежності струму статора і обмотки збудження генератора Т-4376/142 при двофазному короткому замиканні

запропонованою методикою (крива 1), шляхом чисельного інтегрування рівнянь Парка-Горева на основі повної комплексної заступної схеми (крива 2), а також отримані в експерименті (крива 3). З рис. 6 видно, що результати розрахунку частотним методом і за рівняннями Парка-Горева практично співпали між собою. Це свідчить про те, що отримані в роботі аналітичні вирази для струму статора практично є розв'язанням системи диференціальних рівнянь. Найбільша різниця розрахункових та експериментальних значень не перевищує 8,5%.

• Також був виконаний розрахунок двофазного КЗ за умови представлення опору оберненої послідовності постійним дискретним значенням. Отримані результати відрізняються від відповідних повній комплексній схемі не більше ніж на 2%.

У четвертому розділі «Розробка методу експериментального визначення частотних характеристик за даними дослідів ввімкнення нерухомих машин на джерело однофазної напруги промислової частоти» запропоновано визначати ЧХ асинхронних машин за даними реєстрації змінення струмів статора у дослідах включення нерухомих машин в мережу на дві фази.

Математичною моделлю, на якій заснований спосіб, що пропонується, є співвідношення (5) і (6) для визначення струму статора при включенні АМ, що обертається, в мережу на джерело несиметричної напруги.

Очевидно, що при подачі однофазної напруги на дві фази статора нерухомої машини $\dot{U}_1 = -\dot{U}_2$. Тоді, представляючи комплексні значення складових струму через модулі та аргументи, закон змінення просторового вектора перехідного струму статора у режимі, що розглядається, має наступний вигляд:

$$\dot{i}_s(t) = 2U \cdot \text{Im} \left[(I_{0r} e^{j\alpha_{0r}} e^{j\omega t} + I_{1r} e^{j\alpha_{1r}} e^{-\frac{t}{T_a}} + \sum_{k=1}^N I_{2rk} e^{j\alpha_{2rk}} e^{-\frac{t}{T_k}}) e^{j\gamma_0} \right]. \quad (17)$$

На основі отриманої моделі розроблена методика визначення електромагнітних параметрів асинхронних машин.

Передбачається, що відомі: індуктивний опір розсіювання x_σ і активний опір обмотки статора r_s , а також індуктивний опір гілки намагнічування x_μ . В досліді реєструються миттєві значення струмів статора у двох фазах, а також напруга статора. За даними виміру миттєвих величин струму визначаються значення модуля узагальненого вектора перехідного струму статора для різних моментів часу:

$$i_{s,on}(t_l) = \text{Mod}[\dot{i}_s(t_l)] = \sqrt{\frac{2}{3}(i_b^2(t_l) + i_c^2(t_l))}, \quad l = 1, 2, \dots, n, \quad (18)$$

де n - кількість вимірів.

За даними виміру струму і напруги в усталеному режимі після підключення машини до джерела напруги визначається модуль I_{0r} і аргумент α_{0r} вектора усталеного струму \dot{I}_{0r} , які відображають вплив активного опору статора.

Розраховуються початкове значення вектора аперіодичної складової $\dot{I}_{1r(t=0)}$ і постійна часу її загасання T_a :

$$\dot{I}_{1r(t=0)} = \frac{0,5}{x_{\sigma} + x_{\mu} + \frac{r_s}{j}} = I_{1r} \cdot e^{j\alpha_{1r}}; \quad T_a = \frac{1}{\operatorname{Re} \left[\dot{I}_{1r(t=0)} \right] \cdot r_s \cdot \omega}. \quad (19)$$

Таким чином, якщо в лівій частині рівняння (17) відомі миттєві значення вектора $\dot{i}_s(t)$ для різних моментів часу, що знайдені за (18), то у правій частині невідомими є початкові значення модулів I_{2rk} , аргументи α_{2rk} і постійні часу T_{rk} загасання складових струмів, що відображують вплив контурів на роторі у перехідному режимі.

Для їх знаходження при заданій кількості еквівалентних роторних контурів використовується процедура, що базується на пошуку оптимальних рішень перевизначених систем, для яких виконується умова мінімуму інтегрального критерію якості виду

$$J(\bar{\alpha}) = \sum_{l=1}^m \left(\operatorname{Mod}[\dot{i}_s(\bar{\alpha}, t_l)] - i_{s \text{ on}}(t_l) \right)^2 \rightarrow \min, \quad (20)$$

де $k = 1, 2, \dots, m$ – кількість вихідних значень струму;

$\bar{\alpha}$ - вектор шуканих параметрів для заданої кількості N роторних контурів ($I_{2rk}, \alpha_{2rk}, T_{rk}$).

Подальший розрахунок полягає у визначення параметрів заступної схеми, які не враховують вплив активного опору статора. Для цього:

- визначається вектор усталеного струму статора $\dot{I}_{01(t=0)} = \frac{1}{\frac{0,5U}{I_{0r} e^{j\alpha_{r0}}} - \frac{r_s}{j}}$;

- розраховується аперіодична складова $\dot{I}_{11(t=0)} = \frac{U}{x_{\mu} + x_{\sigma}}$;

- знаходиться початкове значення вектора перехідного струму статора, що представляє собою комплексну провідність роторних контурів при ковзанні $s=1$:

$$\dot{I}_{21(t=0)} = -(\dot{I}_{01(t=0)} + \dot{I}_{11(t=0)});$$

- визначаються складові \dot{I}_{21k} струму $\dot{I}_{21(t=0)}$ без урахування активного опору

$$\text{статора } \dot{I}_{21k} = \dot{I}_{2rk} \frac{\dot{I}_{21(t=0)}}{\dot{I}_{2r(t=0)}}; \quad \dot{I}_{2r(t=0)} = \sum_{k=1}^N \dot{I}_{2rk} = \sum_{k=1}^N I_{2rk} e^{j\alpha_{2rk}}.$$

Розраховуються значення активних та індуктивних опорів еквівалентної заступної схеми із винесеною гілкою намагнічування і відповідна їй ЧХ.

Розроблений метод може застосовуватися і для синхронних машин. Проведення дослідів у цьому випадку пов'язане із необхідністю суміщення відповідної вісі магнітної симетрії ротора із полем, що створюється ввімкненими фазами статорної обмотки.

Експериментальна перевірка методики визначення частотних характеристик із дослідів включення в мережу на дві фази проводилася для асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором типу 4A90L4УЗ и двигуна з фазним ротором типу МА36-41/8Ф. В обох випадках були визначені ЧХ і по них

синтезовані одноконтурні заступні схеми.

Оцінка достовірності отриманих електромагнітних параметрів проводилася шляхом співставлення результатів моделювання електромеханічних перехідних процесів під час пуску ненавантажених двигунів з даними натурних випробувань. Як приклад, на рис. 7 наведені залежності струму в одній з фаз статора при подачі на обмотку статора двигуна 4A90L4Y3 напруги 100 В. Практичне співпадання часу пуску (0,7 с) та амплітудних значень струму (похибка не перевищує 5%) протягом всього перехідного процесу підтверджує достовірність отриманих із досліду включення на дві фази параметрів машини.

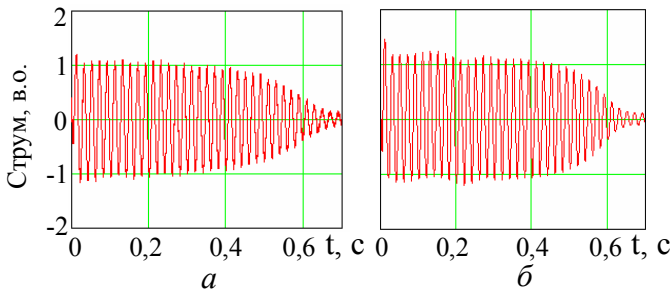


Рисунок 7 – Експериментальна (а) і розрахункова (б) залежності струму статора під час пуску двигуна 4A90L4Y3

Для двигуна МА36-41/8Ф найбільша амплітуда фазного струму статора, що отримана експериментально (5,75 в.о.), відрізняється від відповідного розрахункового значення (6,12 в.о.) на 6,4%. Відмінність обчислених і експериментально отриманих амплітуд струмів статора протягом перехідного процесу не перевищує 5%. Таке ж розходження

спостерігається між розрахунковим і експериментальним значеннями струму ротора.

У п'ятому розділі «Аналіз перехідних процесів у багатомашинних системах» розроблений метод еквівалентування вузлів із групою асинхронних або синхронних машин, який оснований на адекватності результуючої частотної характеристики провідності або опору групи електричних машин і еквіваленту для спрощення математичного моделювання багатомашинних систем.

Якщо всі ЕМ підключені до одного вузла, то їх загальна ЧХ може бути знайдена як сума провідностей окремих машин:

$$y_{\Sigma}(js) = \frac{\sum_{k=1}^n y_k(js) I_{номk}}{\sum_{k=1}^n I_{номk}} = \sum_{k=1}^n \frac{y_k(js) I_{номk}}{\sum_{k=1}^n I_{номk}}, \quad (21)$$

де $I_{номk}$ - номінальний струм k -го двигуна; n - кількість двигунів.

На основі характеристики $y_{\Sigma}(js)$ виконується синтез еквівалентної заступної схеми групи двигунів. Кількість контурів при цьому не перевищує два-три незалежно від кількості двигунів, що еквівалентуються.

Результуючий активний опір статора еквівалентного двигуна $r_{s\Sigma}$ визначається з характеристики $y_{\Sigma}(js)$ наступним чином:

$$r_{s\Sigma} = \left| \operatorname{Im} \left[\frac{1}{y_{r\Sigma}(js)_{s \rightarrow \infty}} \right] \right|. \quad (22)$$

Запропонований спосіб перетворення дозволяє враховувати індивідуальні та

загальні для групи двигунів зовнішні опори. Також можливо визначати не лише сумарні струми підживлення при трифазних коротких замиканнях, але й за необхідності струми у кожному з двигунів. Для цього на основі частотної характеристики усієї системи знаходяться еквівалентні ЧХ окремих двигунів, в яких враховується наявність зовнішніх опорів $y_{rvnk}(js)$, шляхом використання комплексних коефіцієнтів струморозподілу $C_k(js)$:

$$y_{rvnk}(js) = y_{r\Sigma vn}(js) \cdot C_k(js), \quad (23)$$

$$\text{де } y_{r\Sigma vn}(js) = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{y_{rk}(js)} + x_{vnk} + \frac{r_{vnk}}{j} \right) I_{номk}}{\sum_{k=1}^n I_{номk}}; \quad C_k(js) = \frac{y_{rk}(js)}{y_{r\Sigma}(js)}.$$

В результаті такого перетворення двигуни виявляються підключеними до одного вузла і тому є незалежними один від одного.

Запропонований підхід до перетворення складних систем є придатним як для асинхронних, так і для синхронних машин. В останньому випадку внаслідок електромагнітної несиметрії роторів СМ складання еквівалентних заступних схем і розрахунк частотних характеристик багатомашинної системи необхідно проводити для кожної вісі симетрії окремо.

Оцінка ефективності розробленої методики перетворення групи асинхронних двигунів і розрахунку електромагнітних перехідних процесів проводилася на прикладі системи з двох АД типу АО-51-4 і 4А90Л4УЗ, які живляться через загальний знижувальний трансформатор. Аналіз результатів розрахунку струмів трифазного короткого замикання на шинах двигунів і на боці вищої напруги трансформатора (рис. 8) на основі ЧХ (криві 1) показав практичне

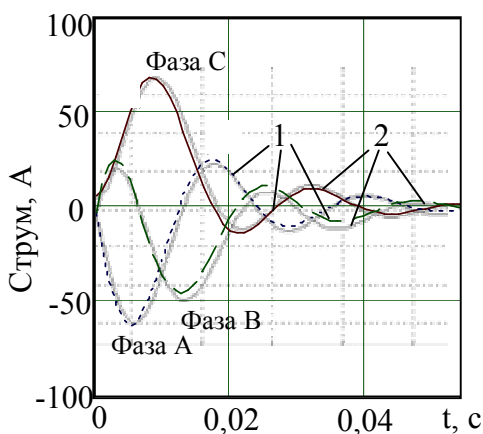


Рисунок 8 – Змінення сумарних фазових струмів двигунів при КЗ за трансформатором

співпадання із результатами моделювання у MATLAB (криві 2). Різниця між амплітудами фазових струмів не перевищувала 5%. Така ж похибка мала місце при визначенні струмів у кожному з двигунів.

Крім того, були виконані розрахунки струмів трифазного короткого замикання на боці вищої напруги трансформатора власних потреб блока 300 МВт. Враховувалася група АД, яка складалася з семи машин. Результати розрахунку струму КЗ від еквівалентного двигуна практично співпали зі струмом, що був отриманий шляхом моделювання вихідної системи в MatLAB. Виявилися близькими також і струми КЗ у кожному з двигунів, що

досліджувались. У всіх випадках розходження не перевищували 1%.

Оцінка можливості застосування способу еквівалентування для аналізу електромеханічних перехідних процесів, яка виконувалась на прикладі дослідження режимів самозапуску АД блока 300 МВт, показала, що

запропонована методика є придатною також і для розрахунку електромеханічних перехідних процесів за умови, що різниця швидкостей обертання окремих машин не перевищує 20%. Дослідження перехідних процесів під час самозапуску двигунів при перерві живлення протягом 1с показали, що похибки не перевищують 7-10%.

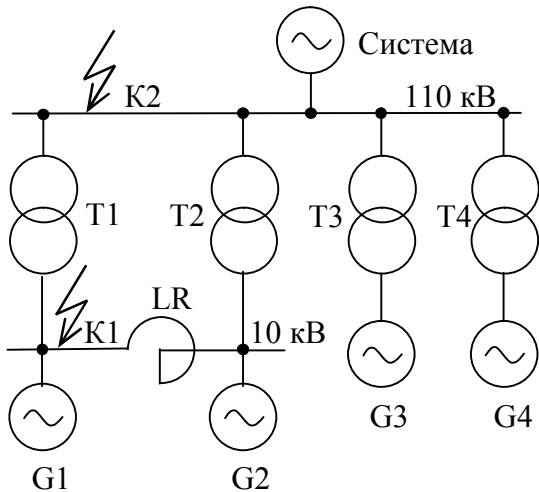


Рисунок 9 - Схема головних з'єднань ТЕЦ

неперетвореній схемі ТЕЦ (а) і обчислень свідчать, що струми еквівалентного генератора і сумарні струми, отримані моделюванням повної схеми станції, відрізняються між собою не більше ніж на 3,4%. Така ж величина похибки отримана і під час аналізу двохфазного короткого замикання. Практичне співпадання параметрів режиму свідчить, що запропонований метод перетворення дозволяє під час розрахунків коротких замикань у складних електричних системах представляти станцію одним еквівалентним генератором.

Перевірка методики еквівалентування стосовно до синхронних машин проводилася на прикладі схеми ТЕЦ (рис. 9) з генераторами різних типів: ТВФ-63-2 ($P_{ном} = 63$ МВт; $U_{ном} = 10,5$ кВ) і ТВФ-120-2 ($P_{ном} = 100$ МВт; $U_{ном} = 10,5$ кВ). Був виконаний розрахунок струмів трифазних і двофазних КЗ на шинах генераторної напруги (точка К1) при врахуванні лише генераторів G1 і G2, а також на шинах вищої напруги (точка К2) при врахуванні всіх генераторів станції. У якості прикладу, на рис. 10 наведені залежності модулів узагальненого вектору струму трифазного КЗ на шинах вищої напруги станції, обчислені у повній

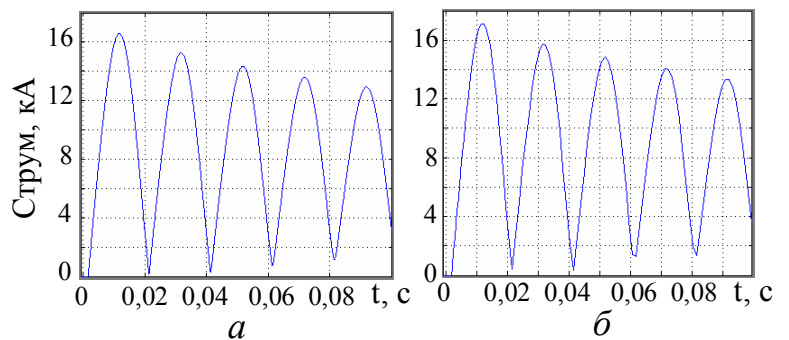


Рисунок 10 – Залежність зображуючого вектора струму трифазного КЗ в точці К2:
а – в неперетвореній схемі ТЕЦ;
б – в еквівалентному генераторі ТЕЦ

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача розвитку частотного методу аналізу перехідних процесів в електричних машинах змінного струму та ідентифікації їх електромагнітних параметрів.

Основним підсумком виконаної роботи, яка направлена на вирішення поставлених у дисертації задач, є отримання наступних нових наукових і

практичних результатів.

1. Отримані математичні співвідношення, які встановлюють зв'язок між частотними характеристиками провідності асинхронних і синхронних машин та симетричними складовими прямої і оберненої послідовності струму статора і контурів ротора динамічного режиму, які виникають при появі несиметрії у колі обмотки статора.

2. Отримали подальший розвиток основані на частотних характеристиках математичні моделі машин змінного струму, які дозволяють, на відміну від відомих підходів, безпосередньо за частотними характеристиками провідності з боку обмотки статора аналітично розраховувати перехідні процеси в асинхронних і синхронних машинах, які включені в трифазну мережу, за умови заданого незмінного у часі ступеня несиметрії напруг.

3. Моделювання неповнофазних режимів при обриві однієї фази, а також двофазних коротких замикань на виводах ізольованих від мережі електричних машин ефективно здійснювати на основі комплексних заступних схем, що представляють собою послідовне з'єднання заступних схем прямої та оберненої послідовностей.

4. Синхронні машини під час моделювання несиметричних коротких замикань повинні представлятися окремими ЧХ по всім магнітної симетрії ротора. Використання усереднених ЧХ для СМ з явно вираженими полюсами призводить до виникнення похибок, які досягають 21,7%. Для турбогенераторів похибка у визначенні струму статора не перевищує 5,6%.

5. Запропоновано новий метод експериментального визначення частотних характеристик асинхронних двигунів за параметрами перехідного процесу, який викликаний включенням нерухої електричної машини на дві фази джерела змінної напруги промислової частоти.

Частотні характеристики, які отримані за даними вимірів у дослідах підключення нерухої асинхронної машини до джерела однофазної напруги промислової частоти, задовільно відображають вплив витіснення струму в обмотках статора і ротора.

6. Проведення серії дослідів при різних значеннях напруги дозволяє отримати сукупність електромагнітних параметрів асинхронних машин, що відповідають різним рівням насичення шляхів магнітних потоків.

7. Методика, що розглядається, також може бути використана для визначення електромагнітних параметрів з дослідів подачі напруги на включені зустрічно дві фазові обмотки статора нерухомих синхронних машин. Для проведення дослідів у цьому випадку необхідно попереднє почергове суміщення вісей d і q магнітної симетрії ротора із результуючим полем, що утворюється струмом у фазних обмотках статора.

8. Розроблений метод еквівалентування вузлів із групою асинхронних чи синхронних машин, який ґрунтується на адекватності результуючої частотної характеристики провідності або опору групи електричних машин та еквівалента, для спрощення математичного моделювання багатомашинних систем. Запропонований підхід дозволяє при дослідженні електромагнітних перехідних

процесів спростити математичну модель складної системи без зниження точності відображення динамічних властивостей кожної машини.

9. Використання комплексних коефіцієнтів струморозподілу дозволяє на основі результуючої частотної характеристики системи визначати еквівалентні частотні характеристики окремих або всіх двигунів, в яких враховується наявність зовнішніх опорів. В результаті такого перетворення двигуни виявляються підключеними до одного вузла живлення без додаткових опорів і тому є незалежними один від одного. Це дозволяє досліджувати електромагнітні перехідні процеси у кожному двигуні окремо.

10. Запропонована методика моделювання перехідних процесів у групі асинхронних двигунів придатна також і для розрахунку електромеханічних перехідних процесів за умови, що різниця швидкостей обертання окремих двигунів не перевищує 20%. Дослідження перехідних процесів під час самозапуску двигунів при перерві живлення протягом 1с показали, що похибки не перевищують 7-10%.

11. Розроблені алгоритми і створений комплекс програм у середовищі математичного пакета MathCAD, який дозволяє розраховувати перехідні процеси в електричних машинах при несиметричних коротких замиканнях або неповнофазних включеннях в мережу, а також динамічні режими у багатомашинних системах при симетричних і несиметричних збуреннях у колі обмоток статора.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ларин А.М. Определение частотных характеристик асинхронных машин из опытов включения их в сеть на две фазы / А.М. Ларин, О.Е. Наумов // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2005. - №1. – С.51-54.

2. Ларин А.М. Математическое моделирование многомашинных систем с асинхронными двигателями частотным методом / А.М. Ларин, О.Е. Наумов // *Вісник СНУ ім. В.Даля*. – 2006. - №1. – С. 99-105.

3. Наумов О.Е. Исследование переходных процессов в группе асинхронных двигателей с использованием преобразования схем замещения / О.Е. Наумов // *Наукові праці ДонНТУ, серія „Електротехніка і енергетика”*, випуск 112. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С.111-118.

4. Naumov O. Mathematical modeling of asymmetrical short-circuits in synchronous generators on the base of frequency characteristics / O. Naumov // *The Advanced Science Open Access Journal*. – Vol. 2012, Issue 5 (December 2012). – P. 101-104. ISSN 2219-746X.

5. Наумов О.Е. Эквивалентирование синхронных генераторов при расчете коротких замыканий в многомашинных системах / О.Е. Наумов, А.М. Ларин // *Наукові праці ДонНТУ, серія „Електротехніка і енергетика”*, випуск 1(12)-2(13). – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – С.173-178.

6. Наумов О.Е. Математическое моделирование несимметричных коротких замыканий на основе частотных характеристик / О.Е. Наумов, А.М. Ларин //

Автоматизація технологічних об'єктів та процесів: Пошук молодих. Зб. наук. праць II Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів (25-26 квітня 2002 р., м. Донецьк). – Донецьк: ДонНТУ, 2002. - С. 514-520.

Особистий внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві: в [1] – розроблений спосіб визначення частотних характеристик і еквівалентних заступних схем за даними досліду включення асинхронної машини в мережу на дві фази; обробка експериментальних даних; в [2] – розроблений метод еквівалентування асинхронних двигунів у багатомашинній системі на основі частотних характеристик; в [5] – удосконалений метод еквівалентування ЕМ у багатомашинній системі стосовно до синхронних генераторів, з метою спрощення математичної моделі системи без зниження точності відображення властивостей окремих машин; в [6] – запропоновано удосконалення математичної моделі ЕМ для аналітичного дослідження несиметричних коротких замикань; отримані співвідношення для визначення струму статора синхронної машини в несиметричному динамічному режимі на основі частотних характеристик.

АНОТАЦІЇ

Наумов О. Є. Розвиток методів аналізу перехідних процесів та ідентифікації параметрів машин змінного струму на основі частотних характеристик. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.01 - Електричні машини і апарати. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». – Донецьк, 2014.

У дисертаційній роботі отримали подальший розвиток теоретичні положення, які характеризують зв'язок між частотними характеристиками електричних машин та перехідними процесами при порушенні симетрії. Розроблені математичні моделі електричних машин у вигляді аналітичних виразів, які дозволяють досліджувати перехідні процеси при несиметричних режимах з урахуванням довільної кількості контурів на роторі.

Запропоновано метод експериментального визначення сукупності електромагнітних параметрів за даними дослідів ввімкнення нерухомої асинхронної машини на джерело однофазної напруги промислової частоти.

Вдосконалено методику моделювання перехідних процесів у багатомашинних системах, що містять асинхронні та синхронні машини.

Ключові слова: електрична машина, перехідні процеси, частотна характеристика, заступна схема, електромагнітні параметри, симетричні складові, коротке замикання.

Наумов О. Е. Развитие методов анализа переходных процессов и идентификации параметров машин переменного тока на основе частотных характеристик. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.01 – Электрические машины и аппараты. – ГВУЗ «Донецкий

национальный технический университет». – Донецк, 2014.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача развития частотного метода анализа переходных процессов применительно к исследованию несимметричных режимов и создания соответствующих методик расчета с учетом многоконтурности и электромагнитной несимметрии ротора.

Основным итогом выполненной работы, направленной на решение поставленных в диссертации задачи, является получение следующих новых научных и практических результатов.

Получены математические соотношения, устанавливающие связь между частотными характеристиками проводимости со стороны обмотки статора и симметричными составляющими прямой и обратной последовательности тока статора и контуров ротора в динамических несимметричных режимах.

Получили развитие математические модели электрических машин переменного тока, которые, в отличие от известных подходов, позволяют аналитически рассчитывать переходные процессы при заданной несимметрии в цепи статора. Показано, что моделирование неполнофазных режимов при обрыве одной фазы и двухфазных коротких замыканий машин, не включенных в мощную сеть, целесообразно выполнять на основе комплексных схем замещения, представляющих собой соединение схем замещения прямой и обратной последовательности.

Произведена оценка погрешности моделирования переходных несимметричных режимов синхронных машин, вызванная использованием усредненной частотной характеристики вместо отдельных характеристик по осям магнитной симметрии ротора.

Предложен способ экспериментального определения частотных характеристик и параметров эквивалентных схем замещения электрических машин при разных уровнях насыщения по данным опытов включения неподвижной машины на две фазы источника напряжения промышленной частоты. Разработана методика определения совокупности электромагнитных параметров асинхронных двигателей по данным опытов включения их в сеть на две фазы. Показано, что данная методика может быть использована для определения электромагнитных параметров синхронных машин, при условии поочередного совмещения продольной и поперечной осей симметрии ротора с полем, создаваемым током во включенных обмотках статора.

Разработан метод эквивалентирования узлов, содержащих группу асинхронных или синхронных машин, основанный на адекватности результирующей частотной характеристики проводимости или сопротивления группы машин и эквивалента. Данный подход позволяет упростить математическую модель системы без снижения точности представления динамических свойств каждой машины. Использование комплексных коэффициентов токораспределения позволяет определять параметры режима каждой из эквивалентируемых машин. Показано, что предложенный метод возможно использовать как при симметричных, так и при несимметричных возмущениях в цепи обмотки статора.

Предложенная методика моделирования переходных процессов в группе асинхронных машин пригодна и для анализа электромеханических переходных процессов, при условии, что разница скоростей вращения машин не превышает 20%.

Разработаны алгоритмы и создан комплекс программ в среде математического пакета MathCAD, позволяющий рассчитывать переходные процессы в электрических машинах при несимметричных коротких замыканиях или включениях на несимметричное напряжение, а также динамические режимы в многомашинных системах при симметричных и несимметричных возмущениях в цепи обмотки статора.

Ключевые слова: электрическая машина, переходные процессы, частотная характеристика, схема замещения, электромагнитные параметры, симметричные составляющие, короткие замыкания.

Naumov O. E. Development of methods for transient processes analysis and alternative current machines parameters determination based on frequency characteristics. – As the manuscript.

The dissertation for academic degree candidate of technical science on the specialty 05.09.01 – electrical machines and apparatuses. – SHEE «Donetsk national technical university». – Donetsk, 2014.

In dissertation the further development of theoretical conceptions which establish a connection between frequency characteristics of AC electric machines and transient processes in asymmetrical operation modes was obtained. Mathematical models of synchronous and asynchronous machines in the form of analytic expressions were obtained, which allow to determine the asymmetrical operation conditions taking into account multiple rotor circuits and influence of the saturation of the magnetic flux ways.

The new method of asynchronous machine frequency characteristics and equivalent circuits parameters determining is offered based on experimental data of two-phase switching on into network.

The method of electromagnetic transient processes analytical modelling in multi-machines system with asynchronous machines is developed.

The set of programs was proposed which allows to calculate transient processes in electrical machines during asymmetrical short-circuit or switching on asymmetrical voltage and also dynamical processes in multi-machine systems during symmetrical commutations, such as three-phase short-circuits.

Key words: electrical machine, transient processes, frequency characteristic, equivalent circuit, electromagnetic parameters, symmetrical components, short-circuits.