

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

Добушовська Ірина Андріївна



УДК 621.372.3

**РЕЗОНАНСНІ РЕЖИМИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ
З ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ**

Спеціальність: 05.09.05 – Теоретична електротехніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – професор кафедри теоретичної і загальної електротехніки Національного університету “Львівська політехніка”, доктор технічних наук **Маляр Василь Сафронівч**

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, доцент **Тиховод Сергій Михайлович**, завідувач кафедри теоретичної і загальної електротехніки Запорізького національного технічного університету, м. Запоріжжя;

доктор фізико-математичних наук, с.н.с.

Куриляк Дозислав Богданович, зав. відділом фізичних основ діагностики матеріалів Фізико-механічного інституту НАН України, м. Львів.

Захист відбудеться “ 23 ” 10 2015 р. о “ 15 ” год. “ 30 ” хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд 114 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “ 10 ” 09 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради, к.т.н., доц.



Коруд В. І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

До складу багатьох електротехнічних пристроїв входять нелінійні індуктивні та ємнісні елементи, які можуть зумовлювати появу резонансу. Незважаючи на те, що резонансні явища лежать в основі роботи багатьох електротехнічних пристроїв, в більшості випадків вони супроводжуються перенапругами або значними струмами. Явище ферорезонансу є причиною значної кількості аварій в електроенергетичних системах.

Проблему дослідження ферорезонансних явищ слід розглядати у двох аспектах: по-перше, необхідно уміти з високою достовірністю прогнозувати появу резонансу в умовах того чи іншого режиму роботи електротехнічного пристрою, а по-друге, важливо вибирати параметри і характеристики реактивних елементів так, щоб в конкретних умовах експлуатації досягались такі значення чи закони зміни напруг та струмів, які забезпечують потрібні експлуатаційні характеристики. Для цього необхідно розробити відповідні проблемно-орієнтовані алгоритми та програми, придатні для вирішення конкретних задач.

Актуальність теми. Дослідження ферорезонансних явищ є однією із важливих задач теорії нелінійних електричних кіл. Поза тим, методи розрахунку електромагнітних процесів, які виникають при цьому, не задовольняють сучасним вимогам щодо точності та ефективності, а отже потребують розвитку і вдосконалення. Особливо актуальною є проблема дослідження якісної та кількісної сторін резонансних явищ в електромеханічних системах та електроприводах, методи комп'ютерного аналізу яких практично не розроблені. Для дослідження можливості появи ферорезонансу і вироблення засобів боротьби з ним у разі негативних його наслідків визначальним є розроблення методів і алгоритмів розрахунку, в яких використовуються моделі елементів електротехнічних пристроїв високого рівня адекватності, що дає змогу з необхідною точністю прогнозувати й аналізувати резонансні процеси. Роль кількісних методів аналізу має особливе значення у зв'язку з використанням комп'ютерної та мікропроцесорної техніки для керування як окремими об'єктами, так і складними системами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи відповідає напрямку науково-дослідних робіт кафедри теоретичної і загальної електротехніки Національного університету "Львівська політехніка" "Математичне моделювання процесів та оптимізація динамічних кіл, електричних і електронних систем". Матеріали дисертації використані під час виконання науково-дослідних держбюджетних робіт:

"Побудова макромоделей компонент електроенергетичних систем на основі експлуатаційних характеристик", ДР № 0111U001224. (2011–2012р.р.);

"Дискретні макромоделі та їх застосування до прогнозування характеристик електроенергетичних систем", ДР № 0113U003194. (2013–2015р.р.)

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є розвиток методів аналізу резонансних режимів нелінійних електричних кіл, що знаходяться під дією періодичних збурень, і створення на їх основі нових високоефективних проблемно-орієнтованих алгоритмів і програм розрахунку режимів роботи електротехнічних пристроїв з конденсаторами в їх контурах.

Об'єктом дослідження є резонансні електромагнітні процеси в нелінійних електричних колах та електромеханічних перетворювачах.

Предметом дослідження є розвиток методів розрахунку ферорезонансних режимів в електричних колах й електричних машинах змінного струму на основі сучасних досягнень теоретичної електротехніки, електромеханіки, обчислювальної математики та комп'ютерної техніки.

Методи дослідження. В основу розроблених в дисертації алгоритмів розрахунку усталених процесів в нелінійних електромагнітних колах покладено проєкційний метод розв'язування крайових задач для систем нелінійних ДР, диференціального та ітераційного методів розв'язування нелінійних систем алгебричних рівнянь, а також матричного числення та векторної алгебри. Для розрахунку перехідних процесів використано числові методи інтегрування ДР. Для апроксимації характеристик намагнічування (ХН) феромагнітних матеріалів використовуються сплайни другого порядку, алгоритм побудови яких розроблений в дисертації.

В роботі використано нелінійні математичні моделі електричних машин, теоретична основа яких розроблена проф. Р.В. Фільцом, в яких враховується як насичення магнітної системи, так і явище скін-ефекту.

Розроблені програми розрахунку базуються на сучасних досягненнях у сфері алгоритмізації та програмування, є самодостатніми й не потребують використання програмного забезпечення, розробленого відомими фірмами.

Для досягнення поставленої мети розв'язано такі задачі:

- проаналізовано існуючі методи розрахунку усталених режимів нелінійних електромагнітних кіл, які працюють в умовах періодичного збурення;
- проаналізовано сучасні методи розрахунку резонансних режимів електричних кіл з нелійними індуктивними елементами;
- розроблено концепцію загального алгоритму розрахунку нелінійних періодичних режимів роботи на основі розв'язування крайової задачі для диференціальних рівнянь стану;
- проаналізовано нелінійні математичні моделі асинхронних та синхронних машин;
- розроблено математичні моделі найважливіших процесів в електричних колах з електромеханічними перетворювачами, в яких можуть виникати ферорезонансні режими;
- проведено методом комп'ютерного симулювання широкий спектр досліджень по перевірці ефективності розроблених алгоритмів і програм розрахунку;
- проаналізовано відомі способи апроксимації ХН електротехнічних сталей та розроблено алгоритм їх апроксимації сплайнами другого порядку.

Наукова новизна одержаних результатів.

- Отримали подальший розвиток методи аналізу електромагнітних кіл з нелійними реактивними елементами.
- Вперше на новій теоретичній основі розроблено комплекс математичних моделей для аналізу резонансних процесів в складних електромагнітних колах при

періодичних збуреннях, які дають змогу отримати залежності координат режиму на періоді, не вдаючись до розрахунку перехідного процесу, та досліджувати характер зміни цих залежностей при зміні будь-якої координати або параметра.

- Вперше розроблено математичну модель для дослідження асинхронних характеристик синхронних двигунів з конденсаторами в обмотці збудження, за допомогою якої можна визначати необхідне для успішного запуску двигуна значення ємності і досліджувати вплив її величини на пускові властивості двигуна та резонансні процеси, які при цьому можуть виникати.

- Розвинуто теоретичні засади та методологічні основи математичного моделювання резонансних процесів в електричних колах з асинхронними двигунами, які дають змогу визначати зумовлені резонансом перенапруги та надструми, що виникають у двигуні при різних способах компенсації реактивної потужності, на основі яких можна визначати оптимальні значення ємності компенсуючих пристроїв.

- Запропоновано метод і алгоритм апроксимації ХН електротехнічних сталей сплайнами другого порядку, при застосуванні яких забезпечується краща від кубічних сплайнів гладкість кривої, що є важливим для розрахунку режимів і характеристик нелінійних електромагнітних кіл числовими методами.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблені алгоритми і програми розрахунку програми можуть бути безпосередньо використані в установах та організаціях, які займаються проектуванням синхронних і асинхронних електроприводів, електроенергетичних систем та засобів автоматичного керування ними, і дають змогу не тільки суттєво знизити вартість та терміни виконання проектно-конструкторських робіт за рахунок заміни фізичного моделювання математичним, але й дослідити ті режими, які на практиці складно або неможливо здійснити.

З використанням розроблених програм можна виконувати дослідження на предмет появи резонансних режимів у складних електротехнічних об'єктах методами комп'ютерного аналізу, визначати гранично допустимі значення їх параметрів, за яких резонанс неможливий. Розроблені методи аналізу можуть слугувати основою для розроблення алгоритмів і програм розрахунку резонансних режимів в електротехнічних пристроях, які не знайшли відображення в дисертації.

Результати досліджень використані під час виконання науково-дослідних робіт кафедри, а також використовуються в навчальному процесі Національного університету "Львівська політехніка" для підготовки магістрів.

Особистий внесок здобувача. В дисертації викладені теоретичні положення, методи й алгоритми, отримані автором особисто. В опублікованих у співавторстві наукових працях автору дисертації належать: [2, 7, 9, 10, 13] – розроблення алгоритмів та їх програмна реалізація; [5, 14] – вивід основних співвідношень, виконання розрахунків; [3, 6, 15] – розробка програми, аналіз результатів математичного моделювання; [4, 8] – розроблення математичної моделі та виконання розрахунків; [12] – розробка методу, алгоритм і аналіз результатів розрахунку, [11] – вивід формул, алгоритм і програма розрахунку.

Апробація результатів дисертації. Основні результати виконаних досліджень доповідались на: International Workshop "Computational Problems of Electrical

Engineering”, IEEE: X – Waplewo, Poland, September, 16–19, 2009; XII – Kostrina, Ukraine, September, 5–7, 2011; XIII-й Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”, м. Кременчук, 2012 р.; XII-й Міжнародній конференції “Проблеми сучасної електротехніки ПСЕ–2014”, Київ, 5–7 червня, 2014 р.; семінарах НАН України з комплексної проблеми “Наукові основи електроенергетики” за напрямком “Моделі та методи комп’ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем”, а також на наукових семінарах кафедри теоретичної та загальної електротехніки Національного університету “Львівська політехніка”.

Публікації. Основні положення дисертації відображені в 13 публікаціях, у тому числі 12 у фахових наукових виданнях, з яких 2 належать до наукометричних.

Структура й обсяг дисертації: Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 165 найменувань, 2 додатків, що підтверджують впровадження результатів роботи. Загальний обсяг роботи – 145 сторінок, у тому числі 127 сторінок основного тексту, 40 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано необхідність проведення досліджень, сформульовано мету та основні задачі роботи, дана загальна її характеристика.

У першому розділі проаналізовано методи дослідження резонансних явищ в різних електротехнічних об’єктах та обґрунтовано вибір напрямку досліджень.

Як свідчать літературні джерела, методи, які використовуються для аналізу резонансних явищ в електричних колах взагалі, і в електромеханічних перетворювачах та електроенергетичних системах зокрема, мають або недостатню точність, або орієнтовані на вирішення конкретних вузьких проблем, тому не задовольняють сучасним вимогам щодо розроблення програмних засобів, спрямованих на забезпечення ефективної їх експлуатації з метою недопущення негативних наслідків та створення автоматизованих систем керування, і перш за все інтелектуальних. Розвиток методів математичного моделювання ферорезонансних електричних кіл можливий лише на основі числових методів, оскільки вони дають змогу зняти обмеження і спрощення, яких потребують аналітичні методи досліджень.

У другому розділі викладено теоретичні основи методу аналізу нелінійних електромагнітних кіл та особливості його застосування до задач математичного моделювання резонансних процесів у складних електротехнічних об’єктах.

Стаціонарний режим в нелінійному електричному колі при періодичному збудженні є динамічним і здебільшого характеризується періодичною негармонічною зміною координат. Тому електромагнітні процеси описуються диференціальними рівняннями (ДР), а розрахунок усталеного режиму полягає у визначенні функціональних залежностей змінних стану впродовж періоду зміни збуджуючої дії.

Явище ферорезонансу зумовлене нелінійністю вебер-амперних характеристик індуктивних елементів. Його особливістю є можливість існування кількох стаціонарних режимів. Зокрема, в зображеному на (рис. 1) колі ферорезонанс напруг виникає, якщо нелінійна статична вольт-амперна характеристика котушки $U_L = IX_L$

та лінійна характеристика конденсатора $U_C = IX_C$ перетинаються (рис. 2). У цьому разі характеристика послідовно з'єднаних котушки і конденсатора $U = U(I)$ є неоднозначною і має як стійку частину, так і нестійку. Перехід через них характеризується стрибкоподібною зміною величини і фази струму на вході кола.

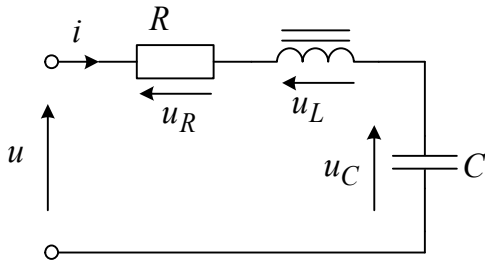


Рис. 1. Послідовний резонансний контур.

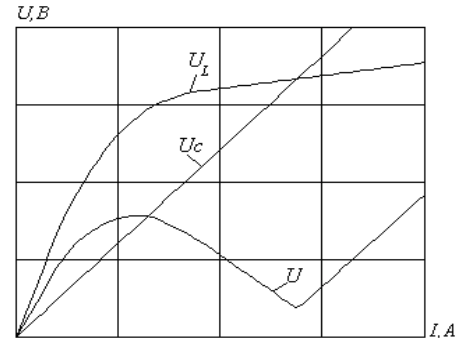


Рис. 2. Статичні характеристики при ферорезонансі.

Стаціонарний режим в нелінійному електричному колі описується системою нелінійних ДР, яку подамо у вигляді векторного ДР m -го порядку вигляду

$$\frac{d\vec{y}(\vec{x}, t)}{dt} = \vec{z}(\vec{y}, \vec{x}, \vec{f}, t), \quad (1)$$

де $\vec{y}(\vec{x}, t)$ – вектор змінних стану; $\vec{x} = \vec{x}(t)$ – вектор шуканих величин; $\vec{z}(\vec{y}, \vec{x}, \vec{f}, t)$ – векторна-функція правих частин, до якої входить вектор $\vec{f}(t)$ зовнішнього збурення (ЕРС та джерел струмів).

У разі періодичного збурення $\vec{f}(t) = \vec{f}(t+T)$ розв'язком системи ДР (1) є T -періодичні залежності компонент вектора $\vec{x}(t) = \vec{x}(t+T)$, віднайти які найбільш ефективно можна шляхом розв'язування крайової задачі розробленим на основі загальної теорії нелінійних коливань проекційним методом, теоретичною основою якого є апроксимація координат стану сплайнами третього порядку. Задача формування крайової задачі розв'язується на сітці $n+1$ вузлових точок періоду T , шляхом апроксимації кожної координати вектора \vec{y} сплайном, який для j -ої ділянки описується рівнянням вигляду

$$y(t) = a_j + b_j(t_j - t) + c_j(t_j - t)^2 + d_j(t_j - t)^3, \quad (2)$$

де a_j, b_j, c_j, d_j – коефіцієнти сплайна; $j = (\overline{1, n})$ – номер ділянки.

З метою спрощення виберемо рівномірний крок $h_j = t_j - t_{j-1} = h$. Співвідношення між коефіцієнтами сплайна визначаються властивостями сплайн-функцій. Зокрема, для кожного j -го вузла при $t = t_j$

$$y(t_j) = y_j = a_j, \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=t_j} = -b_j \quad (3a, б)$$

Виходячи з неперервності сплайна (2), його першої та другої похідних на всьому періоді й періодичних крайових умов, отримуємо рівняння

$$H_1 \vec{A} = H_2 \vec{C}, \quad (4)$$

де $\vec{A} = (\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_n)^*$ та $\vec{C} = (\vec{c}_1, \dots, \vec{c}_n)^*$, (верхній індекс $(*)$ означає транспонування);

$$H_1 = \frac{3}{h} \times \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline -2 & 1 & & \dots & & & 1 \\ \hline 1 & -2 & 1 & \dots & & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & -2 & 1 \\ \hline 1 & & & \dots & & 1 & -2 \\ \hline \end{array} \quad H_2 = h \times \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 4 & 1 & & \dots & & & 1 \\ \hline 1 & 4 & 1 & \dots & & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & 4 & 1 \\ \hline 1 & & & \dots & & 1 & 4 \\ \hline \end{array}$$

Співвідношення між векторами $\vec{B} = (b_1, \dots, b_n)^*$ та \vec{C} визначається рівнянням

$$H_3 \vec{B} = H_4 \vec{C}, \quad (5)$$

де

$$H_3 = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline -1 & & & \dots & & & 1 \\ \hline 1 & -1 & & \dots & & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & -1 & \\ \hline & & & \dots & & 1 & -1 \\ \hline \end{array} \quad H_4 = h \times \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & & & \dots & & & 1 \\ \hline 1 & 1 & & \dots & & & \\ \hline \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hline & & & \dots & 1 & 1 & \\ \hline & & & \dots & & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

з (4), (5) отримаємо

$$H_4 H_2^{-1} H_1 \vec{A} = H_3 \vec{B}. \quad (6)$$

Оскільки, як випливає з (3), $\vec{A} = \vec{Y}$, $\vec{B} = -\vec{Z}$, рівняння (6) набуває вигляду

$$H \vec{Y}(\vec{X}) = D \vec{Z}(\vec{Y}, \vec{X}), \quad (7)$$

де $H = H_4 H_2^{-1} H_1$, $D = -H_3$, $\vec{Y} = (\vec{y}_1, \dots, \vec{y}_n)^*$, $\vec{Z} = (\vec{z}_1, \dots, \vec{z}_n)^*$.

Нелінійна система (7) скінченних рівнянь mn -го порядку є дискретним відображенням нелінійної системи ДР (1) порядку m і апроксимує її на періоді T . Її розв'язком є вектор \vec{X} , компонентами якого є значення струмів віток та напруг на конденсаторах електричного кола у вузлах сітки. Для його визначення використовується ітераційний метод Ньютона. Однак для цього необхідно мати початкове значення вектора \vec{X} , яке знаходиться в околі збіжності ітераційного процесу. Його отримання здійснюється відомим в математиці диференціальним методом, який використовується для розрахунку статичних характеристик. Алгоритм його полягає в наступному.

До вектора \vec{Z} , який відображає функціональні залежності правих частин ДР (1), входять вузлові значення вимушуючих сил, які зумовлюють протікання струмів в електричному колі. Виділимо їх в окремий вектор $\vec{F} = (\vec{f}_1, \dots, \vec{f}_n)^*$, домножимо його на скалярний параметр ε та продиференціюємо отриману параметризовану систему (7) по ε . У результаті отримаємо ДР

$$W \frac{d\vec{X}}{d\varepsilon} = D\vec{F}, \quad (8)$$

де $W = \left(\left(H - D \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{Y}} \right) \frac{\partial \vec{Y}}{\partial \vec{X}} - D \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{X}} \right)$ – матриця Якобі, блоки якої $\left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{y}} \right|_j$, $\left. \frac{\partial \vec{y}}{\partial \vec{x}} \right|_j$, $\left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{x}} \right|_j$

визначаються значеннями параметрів електромагнітного кола в j -му вузлі. Інтегрування системи ДР (8) по ε еквівалентне нарощуванню пропорційно до ε вимушуючих сил від нуля до заданих значень. В результаті знаходимо значення вектора \vec{X} , яке уточнюється методом Ньютона.

Для дослідження впливу на режим роботи електричного кола зміни будь-якого параметра χ , у тому числі й на можливість появи резонансу необхідно, вважаючи вектор збурюючої дії постійним, продиференціювати систему (7) по цьому параметру. В результаті отримуємо систему ДР вигляду

$$W \frac{d\vec{X}}{d\chi} = D \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \chi}, \quad (9)$$

інтегруючи яку, отримуємо багатовимірну характеристику як сукупність векторів \vec{X} , кожен з яких є дискретною періодичною залежністю координат, що відповідають різним значенням параметра χ . За викладеним алгоритмом розрахунку можна віднайти всі теоретично можливі режими.

Застосування методу покажемо на прикладі розрахунку стаціонарного режиму нелінійного електричного кола із взаємоіндуктивними зв'язками (рис. 3).

В записаних у векторній формі вигляду (7) ДР електричної рівноваги для схеми (рис. 3) відповідні вектори є такими:

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ u_c \end{bmatrix}; \quad \vec{z} = \begin{bmatrix} -R_1 i_1 \\ -R_2 i_2 - u_c \\ i_2 / C \end{bmatrix}; \quad \vec{f} = \begin{bmatrix} U_m \sin(\omega t + \alpha) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{x} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ u_c \end{bmatrix}.$$

Блоки матриці Якобі для j -ої вузлової точки періоду мають зміст:

$$\left. \frac{\partial \vec{y}}{\partial \vec{x}} \right|_j = \begin{bmatrix} L_{11j} & L_{12j} & 0 \\ L_{21j} & L_{22j} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{x}} \right|_j = \begin{bmatrix} -r_1 & 0 & 0 \\ 0 & -r_2 & -1 \\ 0 & 1/C & 0 \end{bmatrix}; \quad \left. \frac{\partial \vec{z}}{\partial \vec{y}} \right|_j = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

а вектор \vec{X} складається з n векторів $\vec{x}_j = (i_{1j}, i_{2j}, u_{kj})^*$. Приклад результатів розрахунку наведено на рис. 3.

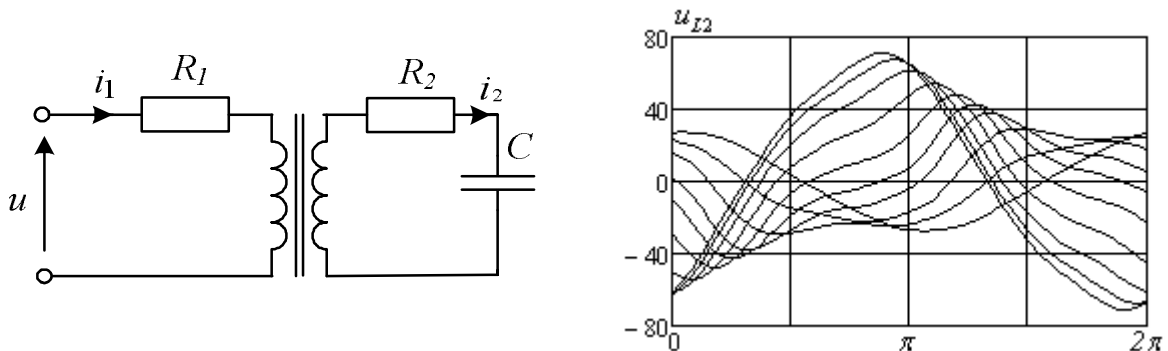


Рис. 3. Електричне коло та криві напруги u_{L_2} на котушці вторинного контуру при різних значеннях вхідної напруги.

Для аналізу процесів в електричних колах з феромагнітними елементами розроблено алгоритм апроксимації ХН сплайнами другого порядку, який забезпечує кращу від кубічних сплайнів гладкість кривої, оскільки має менше осциляцій.

У третьому розділі розроблено математичні моделі розрахунку резонансних електричних кіл з асинхронними двигунами (АД).

АД є основними споживачами реактивної потужності і зумовлюють зниження коефіцієнта потужності в системі електропостачання, а її пересилання призводить до втрат в лінії живлення. Реактивну потужність можна генерувати безпосередньо в місці споживання за допомогою конденсаторів. На практиці використовують як групову, так і індивідуальну компенсацію реактивної потужності, при якій конденсатори під'єднують паралельно до затискачів обмотки статора. Крім того, може застосовуватись і поздовжня компенсація, коли конденсатори вмикають послідовно в лінію живлення. В обох випадках їх наявність може призвести до перенапруг, а також надструмів. На відміну від поперечної компенсації, поздовжня призводить до зміни напруги на АД, а отже впливає на його характеристики. Важливою проблемою є визначення залежностей параметрів компенсації в динамічних режимах, оскільки застосування нерегульованих конденсаторних батарей призводить до недокомпенсації або перекомпенсації, що є неприйнятним.

Для дослідження впливу ємності C послідовно увімкнених конденсаторів (рис. 4) на перебіг процесів під час пуску використовується математична модель АД у фазних осях. Для урахування витіснення струму кожний стержень короткозамкненого ротора розбивається по висоті на k елементарних, в результаті чого обмотка ротора еквівалентується k трифазними обмотками із взаємоіндуктивними зв'язками. У результаті система ДР, яка описує динамічний режим АД, складається із:

трьох рівнянь для статора:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_A}{dt} - \frac{d\psi_B}{dt} &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega_0 t) + u_{kB} - r_A i_A + r_B i_B - u_{kA}; \\ \frac{d\psi_B}{dt} - \frac{d\psi_C}{dt} &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega_0 t - 2\pi/3) + u_{kC} - r_B i_B + r_C i_C - u_{kB}; \\ \frac{di_A}{dt} + \frac{di_B}{dt} + \frac{di_C}{dt} &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

$3k$ рівнянь для ротора:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{aj}}{dt} - \frac{d\psi_{bj}}{dt} &= -r_{aj} i_{aj} + r_{bj} i_{bj} - \alpha(\psi_{bj} - 2\psi_{cj} + \psi_{aj}); \\ \frac{d\psi_{bj}}{dt} - \frac{d\psi_{cj}}{dt} &= -r_{bj} i_{bj} + r_{cj} i_{cj} - \alpha(\psi_{cj} - 2\psi_{aj} + \psi_{bj}); \\ \frac{di_{aj}}{dt} + \frac{di_{bj}}{dt} + \frac{di_{cj}}{dt} &= 0; \quad (j=1, \dots, k) \end{aligned} \quad (11)$$

трьох рівнянь для конденсаторів:

$$\frac{du_{kA}}{dt} = \frac{i_A}{C}; \quad \frac{du_{kB}}{dt} = \frac{i_B}{C}; \quad \frac{du_{kC}}{dt} = \frac{i_C}{C} \quad (12)$$

і рівняння механічної рівноваги

$$\frac{ds}{dt} = \frac{p_0}{J\omega_0}(M_c - M_e), \quad (13)$$

де ψ_ξ, i_ξ, r_ξ , ($\xi = A, B, C, a, b, c, l, \dots, k$) – потокозчеплення, струми та активні опори контурів; U_m – амплітуда фазної напруги; $\alpha = \omega_0(1-s)/\sqrt{3}$; $s = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ – ковзання; ω – кутова швидкість обертання ротора; J – момент інерції системи електроприводу; p_0 – кількість пар полюсів АД; M_c – момент навантаження двигуна; M_e – електромагнітний момент АД в фазних координатах.

Нижче наведені приклади результатів математичного моделювання процесів у двигуні 4AP160S4Y3 ($P=15\text{кВт}$, $U=220\text{В}$, $I=29,9\text{А}$). Як видно з рис. 6, та 7, при ємності конденсаторів $C=950\text{мкФ}$ під час розгону виникає самозбудження, яке переходить в режим субгармонічних коливань з частотою 25 Гц, що призводить до механічних гойдань ротора АД. Однак за деяких значень ємності конденсаторів процес самозбудження не встигає розвинути і двигун розганяється до номінальної швидкості (рис. 5).

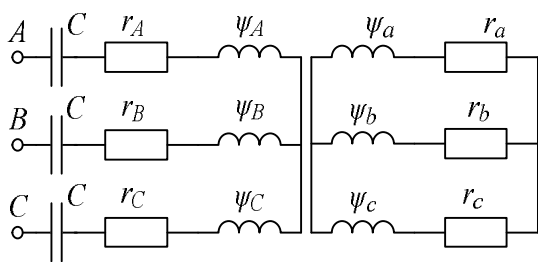


Рис.4. Електрична схема при поздовжній компенсації.

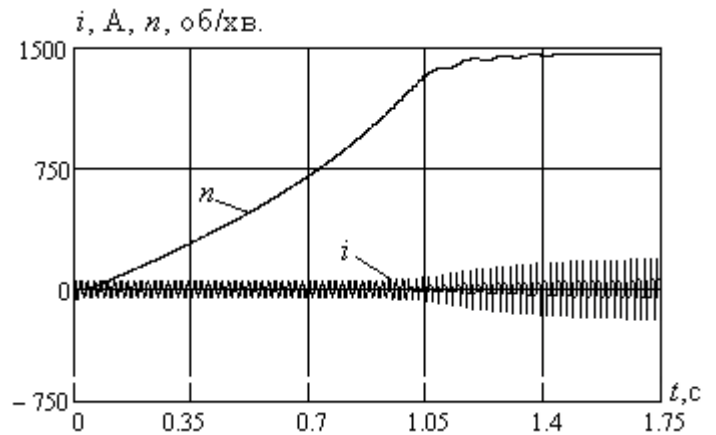


Рис. 5. Залежності струму статора та швидкості обертання ротора під час пуску АД ($C=300\text{мкФ}$).

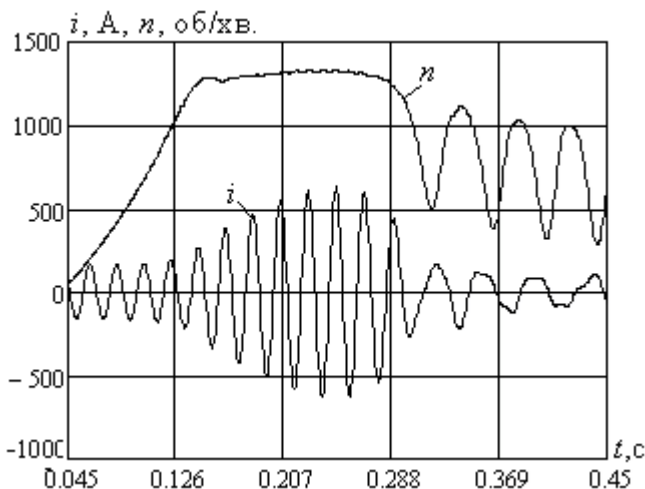


Рис. 6. Залежності струму статора та швидкості обертання ротора під час пуску ($C=950\text{мкФ}$).

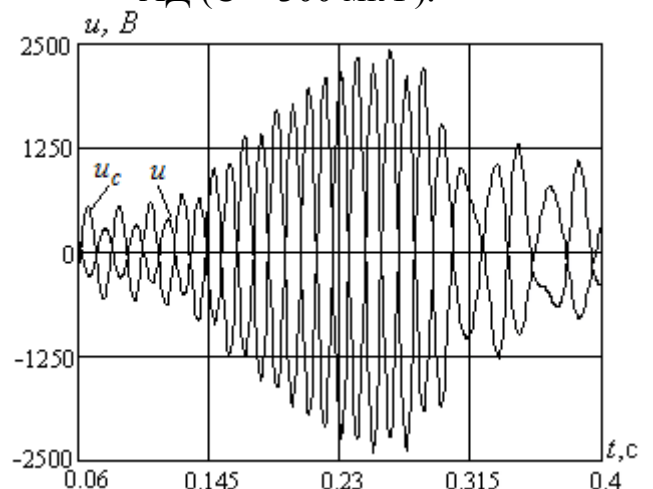


Рис. 7. Залежності напруг на конденсаторі (u_c) і двигуні (u) під час пуску ($C=950\text{мкФ}$).

Найбільш поширеним способом компенсації реактивної потужності АД є вмикання паралельно до обмотки статора конденсаторних установок (КУ), які за умови повної компенсації повинні працювати в режимі резонансу струмів. Задача розрахунку залежності від ковзання параметрів косинусних конденсаторів розв'язується в ортогональних осях x, y , завдяки чому програми мають високу швидкодію, що дає змогу аналізувати процеси і керувати величиною ємності в реальному часі. При цьому електромагнітні процеси в АД, який працює в усталеному режимі з ковзанням s , описуються нелінійною системою алгебричних рівнянь $m=2(k+1)$ -го порядку

$$\begin{aligned} \omega_0 \psi_{sy} - r_s i_{sx} + U_m &= 0; & -s\omega_0 \psi_{1y} - r_1 i_{1x} &= 0; \\ -\omega_0 \psi_{sx} - r_s i_{sy} &= 0; & & \vdots \\ s\omega_0 \psi_{1y} - r_1 i_{1x} &= 0; & s\omega_0 \psi_{ky} - r_k i_{kx} &= 0; \\ & & -s\omega_0 \psi_{kx} - r_k i_{ky} &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

де $\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{1x}, \psi_{1y}, \dots, \psi_{kx}, \psi_{ky}, i_{sx}, i_{sy}, i_{1x}, i_{1y}, \dots, i_{kx}, i_{ky}, r_s, r_1, \dots, r_k$ – потокозчеплення, струми та активні опори перетворених контурів статора та ротора.

Розв'язком нелінійної системи (14) є значення вектора \vec{i} струмів контурів, а елементами матриці Якобі – власні та взаємні диференціальні індуктивні опори. Алгоритм розрахунку складається з двох етапів. На першому визначаються значення координат при $s=1.0$, а на другому, змінюючи ковзання від одиниці до номінального значення, отримуємо багатовимірну статичну характеристику у вигляді $\vec{i} = \vec{i}(s)$, що дає змогу обчислити активну P_∂ та реактивну Q_∂ потужності АД і необхідну для підтримування коефіцієнта потужності установки АД-КУ на рівні $\cos \varphi = \cos \varphi'$ ємність конденсаторів, виходячи з формули

$$C(s) = (Q_\partial - P_\partial \cdot \operatorname{tg} \varphi') / (1,5 \omega_0 U_m^2). \quad (15)$$

Приклади розрахунку відповідних залежностей для АД ($P_n = 15 \text{ кВт}$, $U_n = 380/220 \text{ В}$) наведено на рис. 8 та 9.

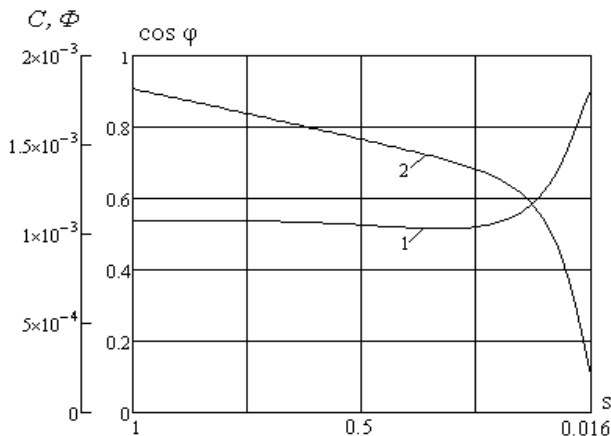


Рис. 8. Залежності $\cos \varphi$ АД (1) та ємності конденсаторів (2), необхідної для підтримання під час пуску системи АД-КУ на рівні $\cos \varphi = 1$, від ковзання.

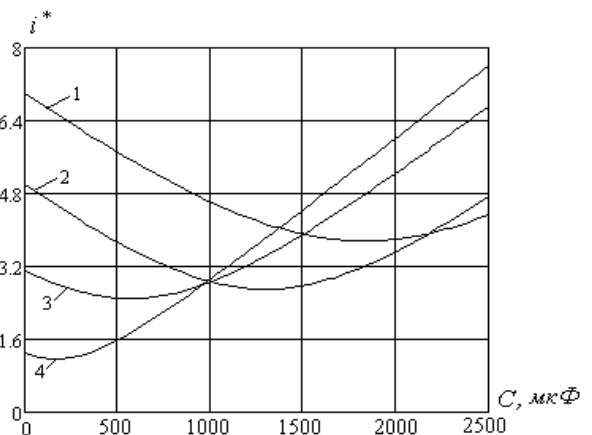


Рис. 9. Залежності струму в лінії живлення системи АД-КУ від ємності конденсаторів при s : 1) – 1,0; 2) – 0,6; 3) – 0,2; 4) – ; 0,05; 5) – 0,016.

У разі втрати живлення АД з паралельно увімкненими конденсаторами (рис. 10) утворюється електрична схема, в якій можуть виникати коливні процеси з частотою, яка визначається параметрами системи КУ–АД. Складність дослідження перехідних процесів при цьому зумовлена наявністю взаємоіндуктивних зв'язків між рухомими контурами АД, активні і індуктивні опори яких змінні. Крім того, на перебіг процесу впливає ЕРС, яка індукується в обмотці статора. Дослідження перехідного процесу в АД з паралельно увімкненими конденсаторами, який виникає під час вимикання напруги, здійснюється за рівняннями (10–13), в яких $U_m = 0$. Початкові умови визначаються шляхом розв'язування системи рівнянь (14). Характер перебігу процесів при цьому залежить від багатьох чинників (рис. 11-12).

На рис. 11 наведено криву фазної напруги АД (глибокопазного) 4AP160S4Y3 ($P=15$ кВт, $U=220/380$ В) при втраті напруги живлення, який працював з номінальним навантаженням і конденсаторами ємністю $C=2500$ мкФ.

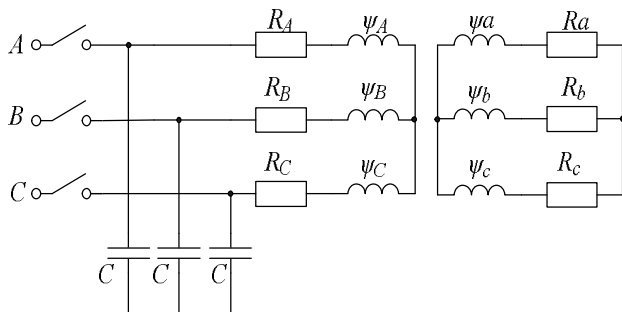


Рис. 10. Розрахункова схема при втраті напруги живлення АД.

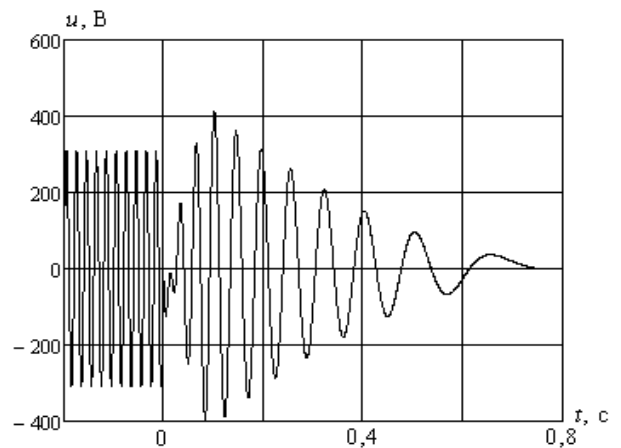


Рис. 11. Часова залежність фазної напруги АД при втраті живлення.

На рис. 12а наведено результати розрахунку напруги, а на рис. 12б струму фази двигуна 4A160S4Y3 ($P=15$ кВт, $U=220/380$ В) з паралельно увімкненими конденсаторами ємністю $C=200$ мкФ при втраті напруги живлення, який працював без навантаження.

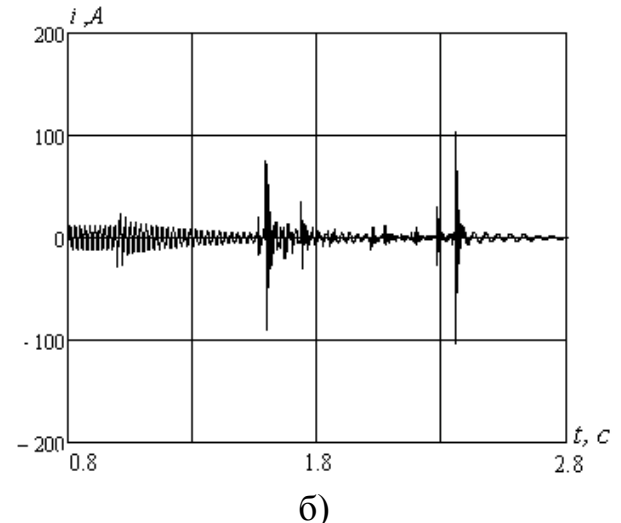
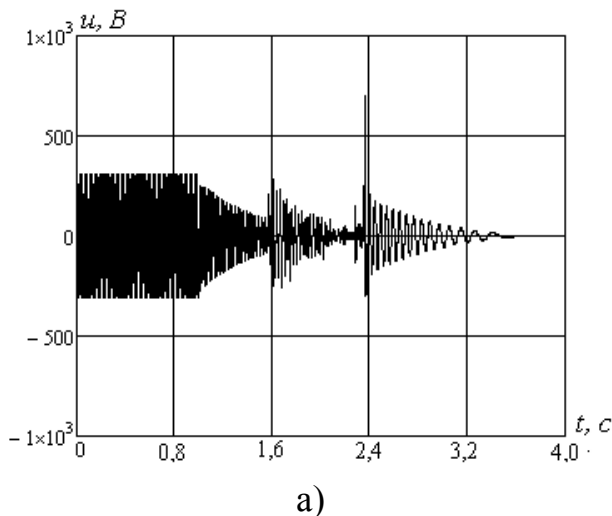


Рис. 12. Часові залежності фазної напруги (а) та струму (б) АД з паралельно увімкненими конденсаторами при втраті напруги живлення .

У четвертому розділі розроблено математичні моделі для дослідження резонансних режимів в синхронних двигунах (СД) з конденсаторами в контурі обмотки збудження, які вмикають для покращення його пускових властивостей.

Основним способом пуску СД є асинхронний, однак кратність пускового моменту, який розвиває двигун, здебільшого недостатня, для забезпечення успішного запуску. Для підвищення пускового моменту можна використати обмотку збудження, проте вона має значну індуктивність, а тому її на час пуску замикають на конденсатори. Основною задачею при цьому є вибір необхідного значення їх ємності, оскільки у разі невдалого його вибору можна досягнути ефекту зниження пускового моменту замість підвищення. Крім того, наявність конденсаторів може призвести до появи перенапруг, які є небезпечними як для обмотки збудження, так і двигуна в цілому з причини зумовлених резонансом значних значень електромагнітного моменту.

Проблема покращення пускових характеристик шляхом вмикання в контур обмотки збудження двигуна конденсаторів потребує вирішення таких задач:

а) розрахунку значення ємності конденсатора, яка б забезпечувала необхідне для практики значення рушійного моменту;

б) розрахунку асинхронної характеристики двигуна, яка відповідає вибраному значенню ємності конденсатора, з метою виявлення резонансних режимів і визначенню максимальних значень струмів, напруг та електромагнітного моменту;

в) розрахунок перехідного процесу пуску СД з метою перевірки його динаміки.

Для дослідження СД з конденсаторами в обмотці збудження в асинхронному режимі використовується система ДР електромагнітної рівноваги осей d, q , в якій враховується насиченням магнітопроводу, і яка має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} &= \omega_0(1-s)\psi_q - r i_d + U_m \sin \theta; & \frac{d\psi_q}{dt} &= -\omega_0(1-s)\psi_d - r i_q + U_m \cos \theta; \\ \frac{d\psi_D}{dt} &= -r_D i_D; & \frac{d\psi_Q}{dt} &= -r_Q i_Q; & \frac{d\psi_f}{dt} &= -r_f i_f + u_c; & \frac{du_c}{dt} &= \frac{i_f}{C}, \end{aligned} \quad (16)$$

де $\psi_d, \psi_q, \psi_D, \psi_Q, \psi_f, i_d, i_q, i_D, i_Q, i_f$ – потокозчеплення та струми контурів СД; U_m – амплітудне значення фазної напруги; θ – кут вибігу ротора; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$, ω_0 – частота напруги живлення обмотки статора; ω – кутова швидкість обертання ротора; u_c – напруга на конденсаторах обмотки збудження ємністю C .

При постійному ковзанні потокозчеплення, струми контурів та напруга на конденсаторах змінюються за періодичним законом з періодом $T_a = 2\pi / (s\omega_0)$. Отже задачу розрахунку асинхронного режиму можна розглядати як крайову для системи ДР (16), розв'язок якої здійснюємо у відповідності з викладеним в розділі 2. Розв'язком є значення вектора \vec{X} , який складається з вузлових значень векторів $\vec{x}_j = (i_{dj}, i_{qj}, i_{Dj}, i_{Qj}, i_{fj}, u_{cj})^*$, ($j = 1, \dots, n$). Розроблена математична модель дає змогу дослідити закони зміни координат як при зміні ємності конденсаторів і незмінному значенні ковзання, так і при зміні ковзання і незмінному значенні ємності.

Для визначення ємності конденсаторів, за якої забезпечується задане значення рушійного моменту, необхідно дослідити вплив величини ємності C на поведінку

двигуна при ковзанні $s = 1,0$. Для цього диференціюємо алгебризовану систему рівнянь по C , вважаючи вектор прикладених напруг постійним.

$$W \frac{d\vec{X}}{dC} = D \frac{\partial \vec{Z}}{\partial C}, \quad (17)$$

в якому W – матриця Якобі, а вектор $\partial \vec{F} / \partial C$ складається з n векторів $\partial \vec{z} / \partial C = (0, \dots, 0, -i_{ff} / C^2)^*$, ($j = 1, \dots, n$). Інтегруючи ДР (17) по C , отримаємо залежності координат вектора $\vec{X} = \vec{X}(C)$, а значить і електромагнітного моменту $M_e = M_e(C)$, від ємності конденсаторів. З цієї залежності вибираємо значення C , при якому забезпечується необхідний пусковий електромагнітний момент.

На основі розрахунку, можна вибрати ті значення ємності, які має сенс досліджувати на перебіг процесу пуску, оскільки, як видно з рис. 14, за деяких значень ємності конденсаторів електромагнітний момент має від'ємне значення.

Задача розрахунку пускових статичних асинхронних характеристик СД розв'язується диференціальним методом. Система ДР при цьому має вигляд

$$W \frac{d\vec{X}}{ds} = D \frac{\partial \vec{Z}}{\partial s} \quad (18)$$

Вектор $\partial \vec{Z} / \partial s$ складається з n векторів $\partial \vec{z} / \partial s = (-\omega \psi_{qj}, \omega \psi_{dj}, 0, \dots, 0)^*$.

Періодичні криві струму i_f обмотки збудження для різних ковзань при незмінній ємності для двигуна СДС3-17-41-16 ($P = 1600$ кВт, $U = 6$ кВ) наведено на рис. 13, а залежність відносного значення пускового електромагнітного моменту від ємності конденсаторів – на рис. 14.

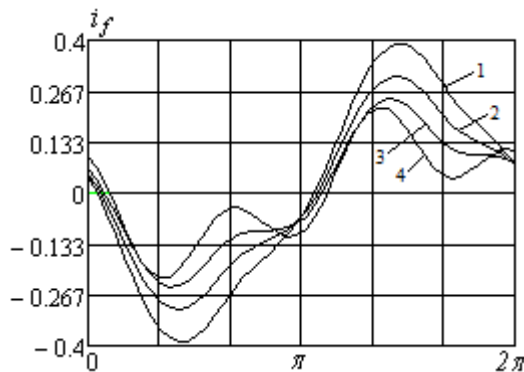


Рис. 13. Періодичні залежності струму i_f обмотки збудження для ковзань: $s = 1,0$ – (1); $s = 0,9$ – (2); $s = 0,8$ – (3); $s = 0,7$ – (4).

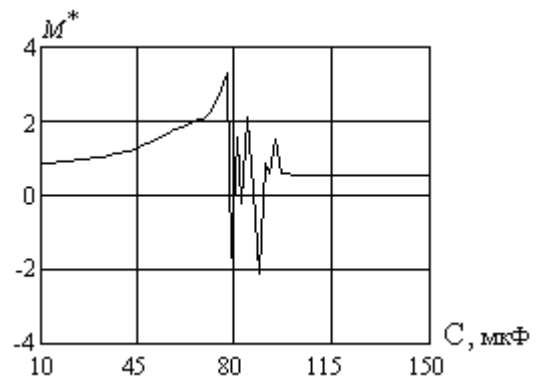


Рис. 14. Залежність відносного значення пускового моменту від величини ємності конденсаторів

Алгоритм розрахунку складається з двох етапів. Спочатку визначаємо значення вектора \vec{X} при значенні ковзання $s = 1,0$, які є початковими умовами для інтегрування векторного рівняння (18) по s в межах від $s = 1,0$ до $s = s_c$.

Статичні пускові характеристики двигуна СДНЗ-2-19-49-24 ($P = 1600$ кВт, $U = 6$ кВ, $I_f = 230$ А, $n = 2500$ об/хв), розраховані при двох значеннях ємності

конденсаторів, наведені на рис. 15. Як видно з рисунка, за допомогою конденсаторів можна значно підвищити пусковий момент, однак за деяких значень ємності виникають значні коливання моменту, що свідчить про появу резонансних явищ.

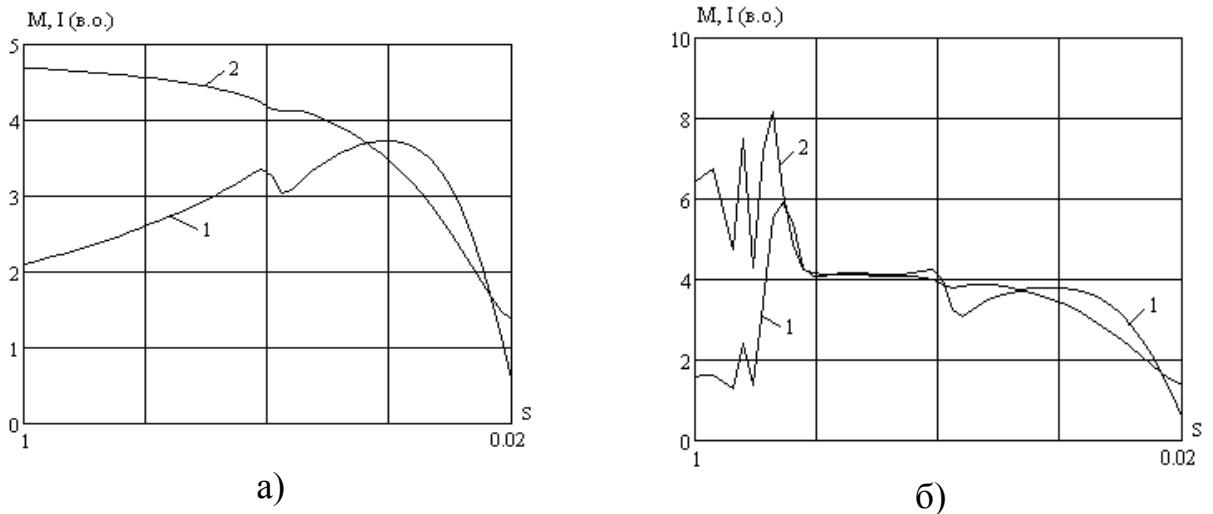


Рис. 15. Залежності відносних значень електромагнітного моменту (1) та струму статора (2) від ковзання при ємностях $C=2,5\text{мкФ}$ (а), та $C=80\text{мкФ}$ (б).

Вибравши значення ємності конденсаторів на основі розрахунку статичних характеристик, необхідно дослідити перебіг перехідного процесу в пусковому режимі шляхом числового інтегрування системи ДР електромеханічної рівноваги. Для цього використовується математична модель СД, в якій пускова обмотка подана реальними контурами, утвореними її стержнями, а не еквівалентна, що підвищує точність розрахунків.

Приклад розрахунку перехідного процесу СД з конденсаторами в обмотці збудження наведено на рис 16.

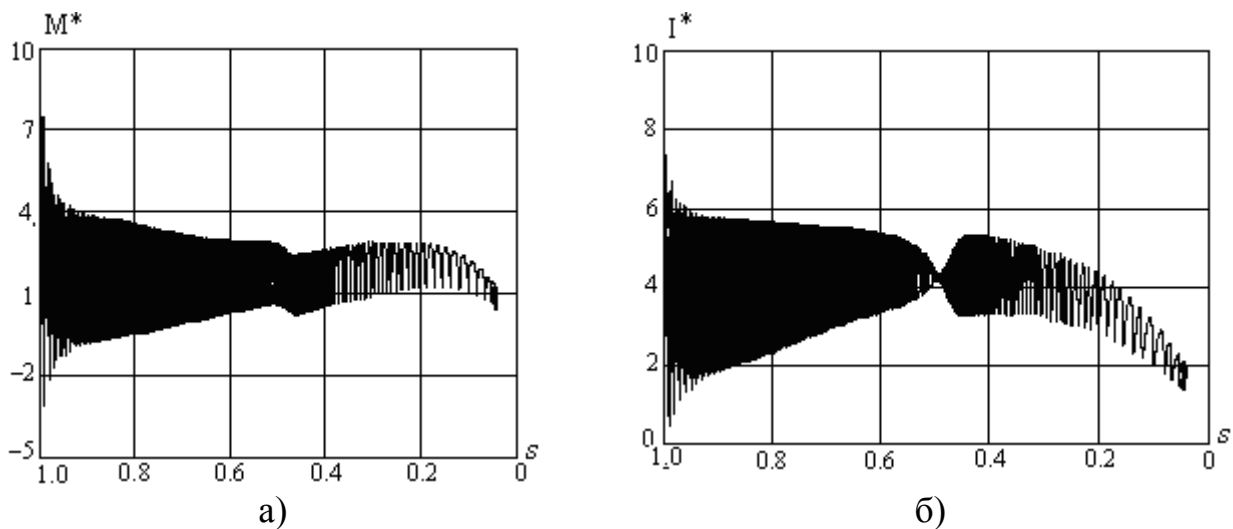


Рис. 16. Залежності від ковзання електромагнітного моменту (а) та струму (б) під час пуску СД з номінальним навантаженням і конденсатором в обмотці збудження ємністю 75мкФ .

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної проблеми теоретичної електротехніки – розвитку та вдосконалення методів розрахунку резонансних процесів в нелінійних електромагнітних колах та електротехнічних пристроях. В ній розроблені нові методи й алгоритми аналізу резонансних режимів в нелінійних електротехнічних об'єктах.

1. Аналіз резонансних явищ в нелінійних електромагнітних колах є найбільш складною і одночасно найменш опрацьованою проблемою нелінійної електротехніки. Відомі методи розрахунку здебільшого засновані на низці спрощуючих припущень, що зумовлено стійкою тенденцією до застосування аналітичних методів розрахунку. Однак явище ферорезонансу має в своїй основі нелінійність характеристик, а тому будь-яке спрощення неминуче призводить не тільки до втрати адекватності, але й може зумовити спотворення якісної сторони процесу. Незважаючи на методологічне значення аналітичних методів аналізу резонансних явищ, їх дослідження на сучасному рівні вимог потребує застосування числових методів.

2. Проблема математичного моделювання резонансних режимів, які можуть виникати в електричних колах, до складу яких входять ЕМП, значно складніша, ніж в статичних електромагнітних колах, оскільки власні та взаємні індуктивності їх контурів змінюються не тільки внаслідок насичення магнітної системи, але й взаємного переміщення контурів, а активні опори залежать від явища скін-ефекту. Оскільки як усталені, так і перехідні резонансні режими в нелінійних електричних колах з ЕМП є динамічними, їх аналіз може бути здійснений лише на основі математичних моделей електричних машин, які дають змогу враховувати зміни їх параметрів.

3. В дисертації на новій теоретичній основі розроблено методологію чисельного моделювання резонансних режимів в нелінійних електричних колах, яка ґрунтується на сплайн-апроксимаціях змінних стану, з використанням яких створені високоефективні алгоритми числового аналізу ферорезонансних процесів в електротехнічних пристроях. В ній розв'язано дві взаємопов'язані задачі: створення математичної основи розрахунку резонансних режимів в нелінійних електричних колах і розроблення математичних моделей розрахунку конкретних режимів електромагнітних кіл із синхронними та асинхронними машинами.

4. Задача розрахунку усталених резонансних процесів в нелінійних електромагнітних колах розв'язується як крайова для нелінійної системи ДР, що описують динаміку об'єкту, що дає змогу отримати залежності змінних стану на періоді, не вдаючись до розрахунку перехідного процесу, і віднайти всі теоретично можливі резонансні режими. Такий підхід дає змогу досліджувати вплив на характер перебігу процесу будь-якої координати або параметра, що є важливим для вирішення задач синтезу та оптимізації.

5. Розроблені алгоритми і програми розрахунку мають в своїй основі математичні моделі ЕМП високого рівня адекватності. З їх використанням розроблено математичні моделі резонансних режимів в електромагнітних колах з

ЕМП. Зокрема, створено математичні моделі для дослідження процесів в усталених і динамічних режимах АД, які працюють в умовах ємнісної компенсації реактивної потужності, а також СД з конденсаторами в обмотці збудження.

Математична модель для дослідження процесів в АД з паралельно увімкненими конденсаторами завдяки застосуванню координатних осей x , y має мінімальний обсяг обчислень, що дає змогу використовувати її для підтримки на заданому рівні коефіцієнта потужності асинхронних електроприводів, які працюють в умовах змінного навантаження.

Для моделювання резонансних процесів в АД, який живиться від мережі через послідовно увімкнені конденсатори, розроблена математична модель в нерухомих трифазних осях. Показано, що за деяких значень ємності в пускових режимах можуть виникати процеси самозбудження і субгармонічних коливань, які супроводжуються коливаннями електромагнітного моменту й швидкості обертання ротора.

Розроблена математична модель для розрахунку усталених асинхронних режимів та пускових характеристик СД з конденсаторами в обмотці збудження дає змогу розраховувати залежності сукупності координат від величини ємності конденсаторів при заданому навантаженні СД й обґрунтовано вибирати величину ємності з метою забезпечення як необхідного пускового та вхідного значення електромагнітного моменту, так і недопущення небажаних резонансних явищ.

6. Як кількісна, так і якісна сторони аналізу резонансних режимів суттєво залежить від способу апроксимації ХН феромагнітних елементів магнітопроводів. Розроблено алгоритм їх апроксимації сплайнами другого порядку, при яких забезпечується гладкість кривої та її похідної, що є суттєвим для забезпечення збіжності ітераційного процесу, який використовується в розроблених математичних моделях.

7. Програмна реалізація розроблених алгоритмів та комп'ютерне симулювання показали високу ефективність й перспективність їх застосування до розв'язання широкого кола інженерних задач аналізу резонансних процесів в нелінійних електромагнітних колах, у тому числі й з електромеханічними перетворювачами.

8. Розроблена в дисертації теоретична база може слугувати основою для розроблення алгоритмів і програм аналізу резонансних процесів в інших складних електротехнічних системах, які не знайшли відображення в роботі.

Публікації за темою дисертації

1. Добушовська І.А. Математичне моделювання періодичних процесів в нелінійних електромагнітних колах // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 4. – С.26 – 28.
2. Маляр В.С., Маляр А.В., Добушовська І.А. Статичні характеристики синхронного двигуна з конденсаторами в колі збудження // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 1. – С.57 – 62.
3. Маляр В.С., Мадай В.С., Добушовська І.А. Динаміка процесів в асинхронному двигуні з послідовно увімкненими конденсаторами // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №2. – С. 14–15.

4. Маляр В.С., Добушовська І.А. Розрахунок усталених режимів в нелінійних електричних колах з реактивними елементами і несинусоїдними джерелами живлення // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – 2011. – Вип. 707 – С. 82–86.
5. Маляр В.С., Добушовська І.А. Компенсація реактивної потужності в асинхронних електроприводах // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №5. – С. 36–38.
6. Маляр В.С., Мадай В.С., Добушовська І.А. Залежність пускового моменту синхронного двигуна від типу та величини опору в обмотці збудження // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19). – С. 99–101.
7. Маляр В.С., Маляр А.В., Добушовська І.А. Перенапруги в асинхронних двигунах з паралельно увімкненими конденсаторами // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №3. – С. 16–18.
8. Маляр В.С., Маляр А.В., Добушовська І.А. Моделювання асинхронних режимів синхронного двигуна з конденсаторами в колі обмотки збудження // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №5. – С. 31–33.
9. Маляр В.С., Добушовська І.А. Пускові властивості синхронних двигунів з ємнісною компенсацією індуктивного опору обмотки збудження // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – 2012. – Вип. 736 – С.99–103.
10. Маляр В.С., Добушовська І.А. Перехідні процеси в асинхронному електроприводі з індивідуальною компенсацією реактивної потужності при втраті напруги живлення // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – 2013. – Вип. 763. – С. 64 – 68.
11. Маляр В.С., Добушовська І.А. Апроксимація характеристик намагнічування електротехнічних сталей сплайнами другого порядку // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. – 2010. – Вип. 671. – С. 67–71.
12. Petro Stachiw, Vasyl Malyar, Iryna Dobuchovska. Effective algorithm of calculating the static modes of nonlinear electromagnetic circuits // Computational Problems of Electrical Engineering. –Vol. 3. – № 2. –2013. – P. 107–112.
13. Vasyl Malyar, Iryna Dobuchovska. Investigation of the Influence of Capacitor in the Excitation Winding Circuit of Asynchronous Motor on its Starting Torque // Computational Problems of Electrical Engineering. –Vol. 2. – № 1. –2012. – P. 81–84.
14. Vasyl Malyar, Andriy Malyar, Iryna Dobushovska. Resonance phenomena in non-linear electric circuits // X-th International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”, IEEE. – Waplewo, Poland, September, 16–19, 2009. – P. 20.
15. Vasyl Malyar, Iryna Dobuchovska. Starting Torque of Synchronous Motor with a Capacitor in the Excitation Winding Circuit // XII International Workshop “Computational Problems of Electrical Engineering”, IEEE. – Kostryna, Ukraine, September, 5–7, 2011. – P. 44.

Добушовська І.А. Резонансні режими в електричних колах з електромеханічними перетворювачами. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.05 – теоретична електротехніка. Національний університет “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація спрямована на вирішення актуальної проблеми теоретичної електротехніки – розвитку та вдосконалення методів розрахунку резонансних процесів в нелінійних електромагнітних колах та електротехнічних пристроях. В ній розв'язано дві взаємопов'язані задачі: створення математичної основи розрахунку резонансних режимів і розроблення на її основі математичних моделей розрахунку конкретних режимів електромагнітних кіл із синхронними та асинхронними двигунами. Розроблений метод дає змогу отримати періодичні залежності змінних стану на періоді, не вдаючись до розрахунку перехідного процесу. Задача розв'язується як крайова для нелінійної системи ДР, що описують динаміку об'єкту, на основі проекційного методу розв'язування крайових задач.

Розроблені математичні моделі для дослідження резонансних режимів в асинхронних двигунах з поздовжньою та поперечною компенсацією реактивної потужності, а також пускових характеристик синхронних двигунів з конденсаторами в обмотці збудження, які дають змогу розраховувати не тільки окремі режими, але й залежності сукупності координат від величини ємності конденсаторів, а також обґрунтовано вибрати величину їх ємності.

Запропонована в дисертації теоретична база може слугувати основою для розроблення алгоритмів і програм числового аналізу резонансних процесів в інших складних електротехнічних системах, які не знайшли відображення в роботі.

Ключові слова: нелінійні електромагнітні кола, стаціонарний режим, періодичний процес, крайова задача, ферорезонанс, математична модель, електромеханічний перетворювач, компенсація реактивної потужності.

I.A. Dobushovska. Resonant modes in electrical circuits with electromechanical converters. On the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.09.05 – Theoretical Electrical Engineering. Lviv Polytechnic National University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

The Dissertation aims at solving urgent problems of theoretical electrical engineering – in development and improvement of methods of calculating the resonant electromagnetic processes in nonlinear circuits and electrical devices. It solved two interrelated problems: creating mathematical basis for calculation of resonant modes and development of calculating mathematical models of the specific modes of electromagnetic circuits with synchronous and asynchronous motors. The method gives a possibility to receive periodic dependences of state variables on the period, without the calculation of the transition process. The problem is solved as a boundary value problem for nonlinear system of differential equations that describe the dynamics of an object, based on the projection method of solving boundary value problems.

Mathematical models were created for research of resonant modes in asynchronous motors with longitudinal and transverse reactive power compensations and starting characteristics of synchronous motors with capacitors in the excitation winding, that allows to calculate not only the individual modes, but also dependences of the aggregate coordinates and capacity of capacitors, and how reasonably choose the value of their capacity.

Theoretical basis proposed in thesis can be a basis for the development of algorithms and programs of numerical analysis of resonant processes in the other difficult electrical systems that were not mentioned in the work.

Key words: nonlinear electromagnetic circuits, stationary mode, periodic process, boundary value problem, ferroresonance, mathematical model, electromechanical converter, reactive power compensation.

Добушовская И.А. Резонансные режимы в электрических цепях с электромеханическими преобразователями. На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.05 – теоретическая электротехника. Национальный университет “Львовская политехника” Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена актуальной проблеме теоретической электротехники – развитию и усовершенствованию методов расчета резонансных процессов в нелинейных электромагнитных цепях и электротехнических устройствах. В ней решено две взаимосвязанные задачи: создания математической основы расчета резонансных процессов в нелинейных электрических цепях и разработки на их основе проблемно ориентированных программ численного анализа резонансных режимов электромагнитных цепей с синхронными та асинхронными машинами. В основу разработанного метода расчета стационарных резонансных режимов положен проекционный метод, который дает возможность получить периодические зависимости координат путем решения краевой задачи, что исключает необходимость расчета переходного процесса. В разработанных программах расчета использованы математические модели двигателей высокого уровня адекватности, в которых учитывается зависимость индуктивных сопротивлений контуров от насыщения и активных сопротивлений от явления скин-эффекта.

Разработана математическая модель для расчета зависимости величины необходимой для компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя емкости параллельно включенных конденсаторов в установившихся и динамических режимах, которая дает возможность исследовать возможность появления при этом перенапряжений и сверхтоков. Задача решается в ортогональных осях x , y . В разработанной математической модели учитывается насыщение магнитопровода асинхронного двигателя и вытеснения тока в стержнях ротора. Разработанный алгоритм расчета зависимости емкости включенных параллельно конденсаторов от скольжения является основой для ее регулирования с целью полной или частичной компенсации реактивной мощности. Програма расчета имеет минимальный объем вычислений при достаточно высокой адекватности, что дает возможность

использовать ее для управления величиной реактивной мощности в регулируемых электроприводах, в частности для поддержания на заданном уровне коэффициента мощности асинхронных электроприводов, которые работают в условиях переменной нагрузки.

Изложен алгоритм и наведены результаты математического моделирования переходных процессов в асинхронном двигателе, который питается от сети через включенные последовательно конденсаторы. Задача решается в неподвижных трехфазных осях. Показано, что при некоторых значениях емкости в пусковых режимах могут возникать процессы самовозбуждения и субгармонических колебаний, которые сопровождаются колебаниями электромагнитного момента и скорости вращения ротора. Разработанная математическая модель позволяет разработать мероприятия по предотвращению этих явлений.

Одним из путей повышения пускового момента явнополюсных синхронных двигателей является замыкание на время пуска обмотки возбуждения на конденсаторы с целью компенсации ее индуктивного сопротивления. Создана математическая модель для расчета асинхронных статических характеристик синхронных двигателей с конденсаторами в обмотке возбуждения и разработаны на основе предложенного метода алгоритмы и программы расчета позволяют осуществлять обоснованный выбор конденсаторов для включения в обмотку возбуждения и исследовать влияние величины емкости на пусковые свойства. С их использованием можно осуществлять многовариантный анализ работы синхронного электропривода в пусковых режимах методами математического моделирования и выбирать оптимальные значения величины емкости конденсаторов и закона ее регулирования в процессе пуска с целью обеспечения необходимого значения не только пускового, но и входного электромагнитного момента. В основу разработанного алгоритма положена нелинейную математическую модель явнополюсного синхронного двигателя, в которой электромагнитные параметры определяются на основе расчета разветвленной схемы замещения магнитопровода.

Для выбранного на основании статической асинхронной характеристики значения емкости конденсаторов в обмотке возбуждения по разработанной программе осуществляется расчет переходного процесса пуска двигателя с целью исследования динамики пуска в заданных условиях работы.

Разработано метод и алгоритм аппроксимации характеристик намагничивания электротехнических сталей сплайнами второго порядка, которые обеспечивают гладкость кривой и ее производной, что является существенным для обеспечения сходимости итерационного процесса, который используется в разработанных математических моделях.

Созданная в диссертации теоретическая база может служить основой для разработки алгоритмов и программ численного анализа резонансных процессов в других электротехнических системах, которые не нашли отображения в работе.

Ключевые слова: нелинейные электромагнитные цепи, стационарный режим, периодический процесс, краевая задача, феррорезонанс, математическая модель, электромеханический преобразователь, компенсация реактивной мощности.

Підписано до друку 01.09.2015 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.
Тираж 100 прим. Зам. 153330.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів
Ресстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.