

АНАЛІЗ ПОВЕДІНКИ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ У РЕЖИМАХ ПЕРЕМИКАННЯ НА РЕЗЕРВНЕ ЖИВЛЕННЯ

Мета. Математичне моделювання і аналіз перехідних і усталених режимів роботи явнопольосних і неявнопольосних синхронних двигунів під час перемикання на резервне живлення.

Методика. Використовуються методи лінійної алгебри, чисельні оптимізаційні методи, методи моделювання та аналізу усталених і перехідних режимів.

Результати. Удосконалено математичну модель явнопольосного і неявнопольосного синхронного двигуна, яку представлено у вигляді заступної схеми, яка дозволяє врахувати ефект витіснення струму і насичення сталі магнітопроводу неявнопольосного двигуна. Пропонується методика визначення параметрів заступної схеми синхронного двигуна на основі паспортних даних, яка дозволяє підвищити точність моделювання в усталених і перехідних режимах. В математичній моделі обмотки статора записані в трифазній системі координат a, b, c , а для обмоток ротора використано координати d, q . Результати математичного моделювання дозволяють визначити величини ударних струмів і механічних моментів синхронного двигуна. Показано, що несинхронне включення синхронного двигуна, що можливе у випадку автоматичного перемикання на резервне живлення, може призвести до пошкодження двигуна. Також ударні струми можуть бути небезпечними для іншого обладнання системи електропостачання. Отже, синхронні двигуни, якщо застосовується автоматичне введення резерву, потребують синхронізації перед включенням в мережу.

Наукова новизна. Удосконалено математичну модель синхронного двигуна з урахуванням витіснення струму і насичення магнітопроводу, удосконалено методику визначення параметрів математичної моделі на основі паспортних даних двигуна, що дозволило підвищити точність моделювання і достовірність його результатів. Проведено моделювання режимів перемикання на резервне живлення і отримано значення ударного струму і ударного механічного моменту двигуна.

Практичне значення. Математична модель синхронного двигуна дозволяє аналізувати поведінку синхронних двигунів у взаємодії в системі електропостачання і виявляти небезпечні стани синхронних двигунів, які можуть виникати в процесі роботи автоматичного вводу резерву. Запропонована модель дозволяє поліпшити точність визначення меж небезпечних станів і підвищити надійність роботи синхронних двигунів і систем електропостачання.

Ключові слова: синхронний двигун, перехідний процес, перемикання на резервне живлення, система електропостачання.

Вступ. Існує велика кількість робіт, у яких розглянуто математичні моделі систем електропостачання з двигунами значної потужності, в яких розглядаються моделі асинхронних і синхронних двигунів, трансформаторів, кабельних та повітряних ліній електропередавання, джерел живлення різного ступеня складності. Як правило, моделі окремих елементів представлено повними або спрощеними системами диференціальних рівнянь, записаних у різних системах координат. Визначення параметрів заступних схем елементів, що входять до складу математичної моделі, є одним з найбільш важливих факторів, що вимагають особливої уваги. Для підвищення точності розрахунків для синхронних двигунів необхідно враховувати явище витіснення струму в роторі і тому є найбільш раціональним використовувати заступні схеми двигунів з двоконтурним ротором. У них ротор представлено двома паралельно включеними контурами, в кожному з яких послідовно включені активний опір R та індуктивність L . Способи визначення параметрів цих кіл на основі паспортних або експериментальних даних є досить складною самостійною задачею, її вирішення розглянуто в роботах [1 – 5] та ін. Для того, щоб такі заступні схеми синхронних двигунів були прийняті за основу математичних моделей для аналізу як усталених, так і динамічних режимів, необхідно розробити методи їх синтезу, які б забезпечували необхідну точність моделювання таких режимів, як пуск, коротке замикання, швидке перемикання на резервне живлення за наявності в роторі залишкового магнітного потоку.

Мета роботи: Розробка математичної моделі і аналіз за її допомогою перехідних і усталених режимів роботи явнопольосного і неявнопольосного синхронних двигунів під час перемикання на резервне живлення.

Стан питання. Синхронні двигуни мають складний характер залежностей активного і індуктивного опорів ротора від насичення і витіснення струму. Тому, розраховуючи параметри синхронних двигунів, необхідно використовувати заступні схеми з нелінійними залежностями параметрів ротора [6]. Відомі методики визначення параметрів заступної схеми, наведені в [1, 7], не придатні для розрахунку статичних і динамічних

характеристик. Методи, які використовують усталені, перехідні і надперехідні опори [8] дозволяють визначати тільки надперехідні струми і струми короткого замикання в усталених режимах і непридатні для розрахунку статичних і динамічних режимів. Також відомі методи, що беруть за основу розрахунок картини електромагнітного поля [9], однак такі методи є складними і мало використовуваними в інженерній практиці.

Результати дослідження. Явнополюсні синхронні двигуни для забезпечення можливості здійснення асинхронного пуску обладнуються пусковою обмоткою, стрижні якої закладаються в полюсні башмаки ротора і електрично з'єднуються між собою, а також зі стрижнями сусідніх полюсних башмаків. В результаті, утворюється повна пускова обмотка в осях d і q , а також обмотка збудження по осі d . У зв'язку із зазначеними конструктивними особливостями явнополюсного ротора синхронного двигуна вплив витіснення струму та насичення на пускові характеристики є незначним і його можна не враховувати. Заступну схему явнополюсного синхронного двигуна в осях d і q наведено на рис. 1.

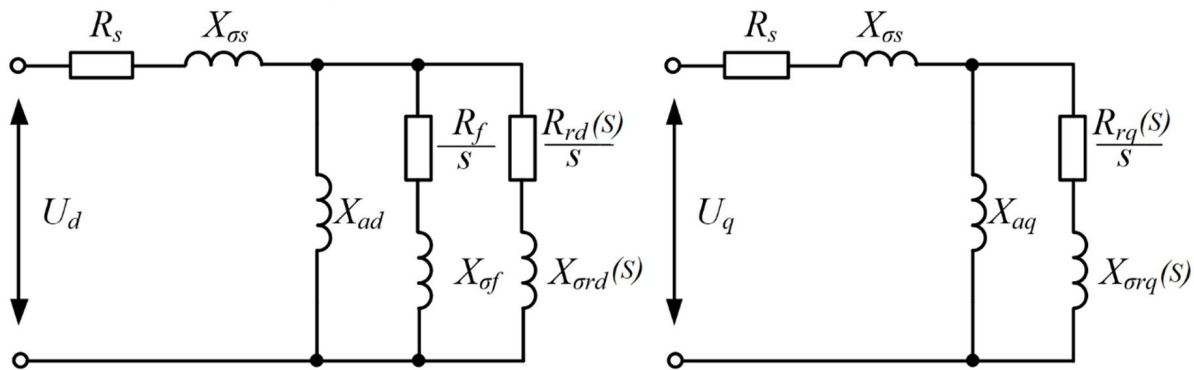


Рис.1. – Еквівалентні заступні схеми явнополюсного синхронного двигуна по осях d і q

Розглянемо метод визначення параметрів пускової обмотки та інших параметрів заступної схеми за вихідними паспортними даними. Як вихідні дані прийнемо відомі значення: активний опір обмотки статора R_S , індуктивний опір розсіювання обмотки статора $X_{\sigma S}$, індуктивні опори взаємоіндукції по осях d і q X_{md} і X_{mq} , індуктивний опір розсіювання обмотки збудження $X_{\sigma f}$, надперехідні індуктивні опори по осях d і q X_d'' і X_q'' , а також сталі часу демпферної обмотки по осях d і q T_{d0} і T_{q0} і обмотки збудження T_{f0} . Так, наприклад, в табл. 1 наведено у відносних одиницях (в.о.) такі паспортні дані для синхронного явнополюсного двигуна СДС3-2000-100: індуктивний опір розсіювання обмотки статора, індуктивні опори взаємоіндукції по осях d і q , індуктивні опори розсіювання обмотки збудження, надперехідні індуктивні опори по осях d і q , а також постійні часу демпферної обмотки по осях d і q і обмотки збудження.

Таблиця 1 - Вихідні паспортні дані двигуна СДС3-2000-100 у в.о.

R_S	$X_{\sigma S}$	X_{md}	X_{mq}	$X_{\sigma f}$	X_d''	X_q'	T_{d0}	T_{q0}	T_{f0}
0,015	0,135	0,604	0,374	0,153	0,183	0,187	0,024	0,019	1,8

У подальшому за замовчанням розрахунки будемо вести у відносних одиницях.

За заступною схемою (рис. 1) для ковзання $s = \infty$ для надперехідного і перехідного опорів визначимо такі залежності:

$$X_q'' = X_q', \quad (1)$$

$$X_d'' = X_{\sigma S} + \left(\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma d}} \right), \quad (2)$$

$$X_q'' = X_{\sigma S} + \left(\frac{1}{X_{mq}} + \frac{1}{X_{\sigma q}} \right). \quad (3)$$

Із залежностей (1 - 3) визначимо індуктивні опори розсіювання демпферної обмотки по осях d і q :

$$X_{\sigma rd} = \left(\frac{1}{X_d'' - X_{\sigma S}} - \frac{1}{X_{md}} - \frac{1}{X_{\sigma f}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,183 - 0,135} - \frac{1}{0,604} - \frac{1}{0,153} \right)^{-1} = 0,0791 ;$$

$$X_{\sigma rd} = \left(\frac{1}{X_q'' - X_{\sigma s}} - \frac{1}{X_{mq}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,187 - 0,135} - \frac{1}{0,374} \right)^{-1} = 0,0604 .$$

Активні опори демпферної обмотки визначимо так:

$$R_{rd} = \frac{X_{\sigma rd} + X_{md}}{314 \cdot T_{d0}} = \frac{0,0791 + 0,604}{314 \cdot 0,024} = 0,0906 ;$$

$$R_{rq} = \frac{X_{\sigma rq} + X_{mq}}{314 \cdot T_{q0}} = \frac{0,0604 + 0,374}{314 \cdot 0,019} = 0,0728 ;$$

$$R_f = \frac{X_{\sigma f} + X_{md}}{314 \cdot T_f} = \frac{0,135 + 0,604}{314 \cdot 1,80} = 0,0013 .$$

Найчастіше відсутні відомості про перехідні і надперехідні опори і всі сталі часу, а є лише такі паспортні дані: номінальна потужність P_H , номінальний струм I_H статора, максимальний M_M і пусковий M_{Π} моменти, кратність пускового струму I_{Π} щодо номінального, струм обмотки збудження I_{fH} і напруга обмотки збудження U_{fH} або її стала часу T_{f0} .

У таких випадках параметри заступної схеми у в. о. будемо розраховувати, наприклад для двигуна ДСЗ-2209, паспортні дані якого наведені в табл. 2., таким методом.

Таблиця 2 - Паспортні дані синхронного двигуна ДСЗ-2209

P_H , кВт	I_H , А	n , об/хв	$\cos \varphi_H$, в.о.	η_H , в.о.	I_{Π} , в.о.	M_{Π} , в.о.	M_M , в.о.	I_{fH} , А	U_{fH} , В	T_{f0} , в.о
2460	274	100	0,9	0,938	5,2	1,5	1,3	275	192	1,44

Синхронний індуктивний опір по осях d і q визначимо за формулами:

$$X_q = \frac{\sin \phi_H + \cos \phi_H \cdot \sqrt{M_M^2 \eta_H^2 - 1}}{M_M^2 \eta_H^2 \cos^2 \phi_H} = \frac{0,436 + 0,9 \cdot \sqrt{2,3^2 \cdot 0,938^2 - 1}}{2,3^2 \cdot 0,938^2 \cdot 0,9^2 - 1} = 0,778;$$

$$X_d = 1,67 \cdot X_q = 1,67 \cdot 0,778 = 1,297.$$

Індуктивний опір розсіювання статора $X_{\sigma s}$ і індуктивні опори гілок намагнічування по осях d і q

розрахуємо за такими виразами:

$$X_{\sigma s} = \frac{1}{2 \cdot K_i} = \frac{1}{2 \cdot 5,2} = 0,0962;$$

$$X_{md} = X_d - X_{\sigma s} = 1,297 - 0,0962 = 1,2;$$

$$X_{mq} = X_q - X_{\sigma s} = 0,778 - 0,0962 = 0,682.$$

Параметри обмотки збудження визначимо за її відомою сталою часу T_{f0} , прийнявши за вихідні співвідношення:

$$X_d' = 1,5 \cdot X_d''; , \quad (4)$$

$$X_d'' = \frac{1}{I_{\Pi}}; , \quad (5)$$

$$X_q'' = 1,1 \cdot X_d''; . \quad (6)$$

Тоді, з (2) з урахуванням (4 - 6) можна визначити індуктивний опір розсіювання обмотки збудження, а потім її активний опір:

$$X_{\sigma f} = \frac{X_{md}}{I_{\Pi} \cdot X_{md} - 1} = \frac{1,2}{5,2 \cdot 1,2 - 1} = 0,229;$$

$$R_f = \frac{X_{\sigma f} + X_{md}}{314 \cdot T_{f0}} = \frac{0,229 + 1,2}{314 \cdot 1,44} = 0,00316.$$

Якщо стала часу обмотки збудження не відома, а відомі її номінальні напруга і струм, то активний опір обмотки збудження наближено можна знайти як:

$$R_f = \frac{U_{fH} - \Delta U_{fH}}{I_{fH}} = \frac{0,7 \cdot U_{fH}}{I_{fH}} = \frac{0,7 \cdot 192}{275} = 0,4887 \text{ Ом.}$$

Для того, щоб знайти активний опір обмотки збудження у відносних одиницях знайдемо базисний опір кола збудження Z_f^{baz} , але для цього визначимо спочатку ЕРС обмотки збудження в номінальному режимі E_{fH}^* :

$$E_{fH}^* = \sqrt{1 - \left(\frac{M_H}{M_M}\right)^2} + X_d \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{M_H}{M_M}\right)^2} \cdot \frac{1}{X_q^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2,3}\right)^2} + 1,297 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2,3}\right)^2} \cdot \frac{1}{0,778^2} = 1,975;$$

$$Z_f^{baz} = \frac{\sqrt{3} U_H I_H (E_{fH}^*)^2}{I_{fH}^2 (X_{md}^*)^2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 274 \cdot 1,975^2}{275^2 \cdot 1,2^2} = 102 \text{ Ом.}$$

Опір обмотки збудження у відносних одиницях визначимо як:

$$R_f^* = \frac{R_f}{Z_f^{baz}} = \frac{0,4887}{102} = 0,00479.$$

Активний опір обмотки статора R_s знайдемо, прийнявши допущення, що втрати в міді статора в номінальному режимі становлять 25-30% від загальних втрат:

$$R_s \cong 0,25 \cdot (1 - \eta_H) = 0,25 \cdot (1 - 0,938) = 0,0155.$$

С урахуванням несиметрії ротора по осях приймаємо, що:

$$m_q'' \cong 1,2 \cdot M_H \eta_H \cos \phi_H = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 0,938 \cdot 0,9 = 1,52;$$

$$i_{sq}'' = 0,8 \cdot I_H = 0,8 \cdot 5,2 = 4,16.$$

Вхідний опір синхронного двигуна по осі q можна тепер визначити за такими формулами:

$$R_{sq}^{s=1} = R_s + \frac{m_q''}{(i_{sq}'')^2} = 0,0155 + \frac{1,52}{4,16^2} = 0,1033;$$

$$X_{sq}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sq}''}\right)^2 - (R_{sq}^{s=1})^2} = \sqrt{\frac{1}{4,16^2} - 0,1033^2} = 0,217.$$

Загальний опір роторного кола і кола намагнічування по осі q знаходимо як:

$$R_{rmq}^{s=1} = R_{sq}^{s=1} - R_s = 0,1033 - 0,0155 = 0,0878;$$

$$X_{rmq}^{s=1} = X_{sq}^{s=1} - X_{\sigma s} = 0,217 - 0,0962 = 0,1209.$$

Провідності пускової обмотки по осі q можуть бути визначені за такими формулами:

$$g_{rq} = \frac{R_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1 2} + X_{rmq}^{s=1 2}} = \frac{0,0878}{0,0878^2 + 0,1209^2} = 3,933;$$

$$b_{rq} = \frac{X_{rmq}^{s=1}}{R_{rmq}^{s=1 2} + X_{rmq}^{s=1 2}} - \frac{1}{X_{mq}} = \frac{0,1209}{0,0878^2 + 0,1209^2} - \frac{1}{0,682} = 3,95.$$

Опір пускової обмотки по осі q на основі відомих провідностей розрахуємо за формулами:

$$R_{rq} = \frac{g_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2} \cdot S = \frac{3,933}{3,933^2 + 3,95^2} \cdot 1 = 0,127;$$

$$X_{\sigma rq} = \frac{b_{rq}}{g_{rq}^2 + b_{rq}^2} = \frac{3,95}{3,933^2 + 3,95^2} = 0,127.$$

Аналогічно розраховуємо опір пускової обмотки по осі d. Знаходимо спочатку вхідний опір синхронного двигуна по осі d:

$$R_{exd}^{s=1} = R_s + \frac{m_d''}{(i_{sd}'')^2} = 0,0155 + \frac{1,013}{6,24^2} = 0,0415;$$

$$X_{exd}^{s=1} = \sqrt{\left(\frac{1}{i_{sd}''}\right)^2 - \left(R_{exd}^{s=1}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{6,24^2} - 0,0415^2} = 0,155.$$

Загальний опір роторного кола і гілки намагнічування по осі d становить:

$$R_{rmdf}^{s=1} = R_{exd}^{s=1} - R_s = 0,0415 - 0,0155 = 0,026;$$

$$X_{rmdf}^{s=1} = X_{exd}^{s=1} - X_{\sigma s} = 0,155 - 0,0962 = 0,0588.$$

Провідності і опір пускової обмотки по осі d синхронного двигуна знайдемо як:

$$g_{rd} = \frac{R_{rmdf}^{s=1}}{\left(R_{rmdf}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{rmdf}^{s=1}\right)^2} - \frac{R_f}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2} = \frac{0,026}{0,026^2 + 0,0588^2} - \frac{0,00316}{0,00316^2 + 0,229^2} = 6,23;$$

$$b_{rd} = \frac{X_{rmdf}^{s=1}}{\left(R_{rmdf}^{s=1}\right)^2 + \left(X_{rmdf}^{s=1}\right)^2} - \frac{X_{\sigma f}}{R_f^2 + X_{\sigma f}^2} - \frac{1}{X_{md}} =$$

$$= \frac{0,0588}{0,026^2 + 0,0588^2} - \frac{0,229}{0,00316^2 + 0,229^2} - \frac{1}{1,2} = 9,026.$$

Опір пускової обмотки по осі d на основі відомих провідностей розрахуємо за формулами:

$$R_{rd} = \frac{g_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2} \cdot S = \frac{6,23}{6,23^2 + 9,026^2} \cdot 1 = 0,052;$$

$$X_{ord} = \frac{b_{rd}}{b_{rd}^2 + g_{rd}^2} = \frac{9,026}{6,23^2 + 9,026^2} = 0,075.$$

Математична модель синхронного двигуна у фазних координатах будується аналогічно до математичної моделі асинхронного двигуна, яку було розглянуто в [4], але в моделі синхронного двигуна підматриця індуктивностей статор-статор L_{S-S} залежить від кута положення ротора γ і система диференціальних рівнянь ротора доповнюється рівнянням для обмотки збудження. Вираз для визначення протидійної ЕРС синхронного двигуна має вигляд:

$$\xi_{CD} = E_S(\gamma) + L_{S-R}(\gamma) \cdot \tilde{L}_{R-R} \cdot [U_R - R_R \cdot I_R - E_R(\gamma)],$$

де:

$$E_S(\gamma) = \omega \cdot \left(\frac{dL_{S-S}(\gamma)}{d\gamma} \cdot I_S + \frac{dL_{S-R}(\gamma)}{d\gamma} \cdot I_R \right);$$

$$E_R(\gamma) = \omega \cdot \frac{dL_{R-S}(\gamma)}{d\gamma} \cdot I_S.$$

Отже, ми визначили всі параметри заступної схеми (рис.1) розглянутого синхронного двигуна, які наведені в табл. 3. Збіг значень струмів, моментів і ККД, отриманих у результаті розрахунку на основі параметрів заступної схеми, зі значеннями, наведеними в паспортних даних, показано в табл. 4.

Таблиця 3 - Параметри еквівалентної заступної схеми у в.о.

Тип двигуна	R_s	$X_{\sigma s}$	X_{md}	X_{mq}	R_d	X_d	R_q	X_q	R_f	X_f
ДСЗ-2209	0,016	0,096	1,2	0,68	0,052	0,075	0,127	0,127	0,0036	0.229

Таблиця 4 - Порівняння розрахункових і паспортних даних синхронного двигуна ДСЗ-2209.

Параметр	Паспортні значення, в.о.	Значення, розраховані на основі параметрів заступної схеми, в.о.
I_{Π}	5,2	5,2
M_{Π}	1,5	1,5
M_M	1,3	1,3
η_H	0,938	0,93
I_H	1	1
M_H	1	1

Розраховані за параметрами еквівалентної схеми заміщення статичні характеристики (залежність струмів статора і моментів від ковзання) наведено на рис.2,3.

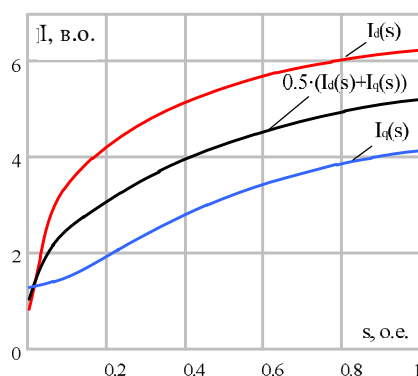


Рис.2. – Залежності струмів синхронного двигуна від ковзання

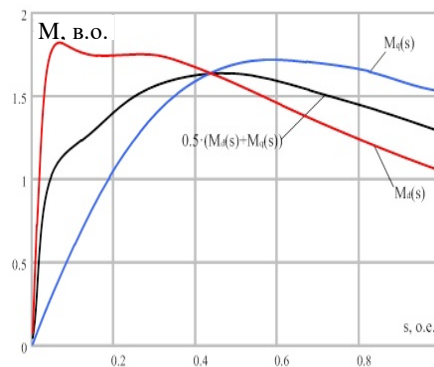


Рис.3 – Залежності моментів синхронного двигуна від ковзання

Для аналізу динамічних характеристик синхронного двигуна скористаємося системою диференціальних рівнянь, записаних в осях а, b, с статора, яка має вигляд:

$$\begin{bmatrix} pI_S \\ pI_R \end{bmatrix} = L(\gamma)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} U_S \\ U_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_S & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} - \omega \cdot \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \cdot \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix};$$

Результати розрахунку за допомогою цих рівнянь режиму пуску синхронного двигуна наведено на рис.4.

Також за допомогою розробленої математичної моделі було змодельовано поведінку синхронної машини в режимі перемикання на резервне живлення. Розраховувався найважчий режим з форсуванням збудження. Результати зведено в табл. 5.

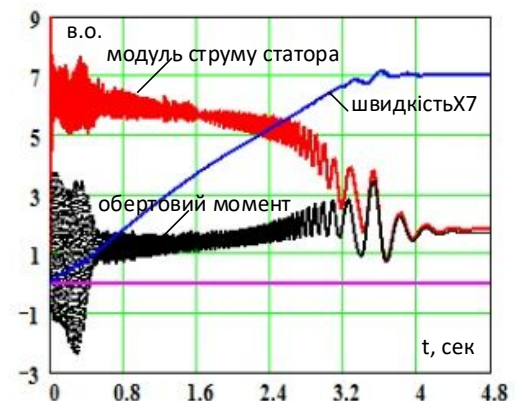


Рис. 4. – Осцилограми пуску синхронного двигуна

Таблиця 5 Кратність ударних (максимальних миттєвих) струму, моменту, потужності і відхилення кутової швидкості в залежності від кута зсуву напруги $\Delta\beta$

	Пускові величини	Включення резервного джерела з різними кутами зсуву $\Delta\beta$ напруги,							
Кут, град	0	30	60	90	135	180	225	315	355
I_s , в.о.	9,25	3,3	8	12	15	17,37	17,7	9,3	3
M , в.о.	3,7	-3,4	-8,8	-11	-13,8	-13,52	-8,17	6,74	2,5
P , в.о.	6,7	-3,05	-7,8	-12,6	-11,6	-10,28	12,3	8,3	2,3
ω , в.о.	0	0,97	0,946	0,92	0,9	0,915	0,91	1,04	1

З табл. 5 видно, що найбільші навантаження на двигун виникають у випадку, коли фаза резервного живлення відрізняється від фази основного джерела на 135 градусів. Для такого випадку на рис.5 – 7 наведено осцилограми струму статора, активної потужності і обертового моменту.

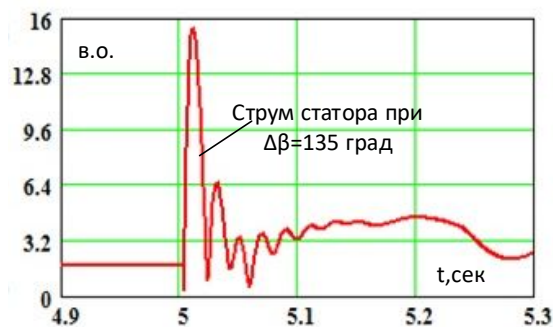


Рис.5 – Осцилограма струму статора синхронного двигуна під час автоматичного вводу резерву

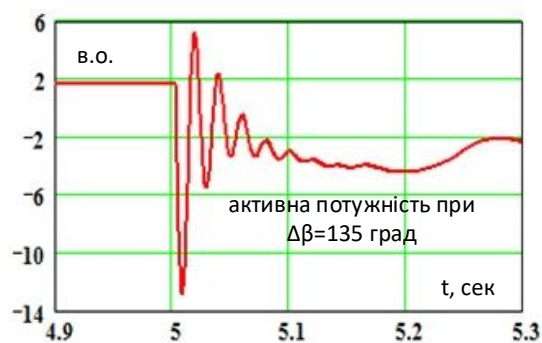


Рис.6 – Осцилограма активної потужності синхронного двигуна під час автоматичного вводу резерву



Рис.7 – Осцилограма обертового моменту синхронного двигуна під час автоматичного вводу резерву

Визначимо параметри заступної схеми і математичну модель неявнополюсного синхронного електродвигуна. Конструкція неявнополюсного синхронного двигуна має певні особливості. Зазвичай це двополюсні машини великої потужності, в яких відцентрові сили занадто великі для конструкції явнополюсного ротора. Ротор такої машини виготовляється з масивного сталевго кування з фрезерованими пазами для обмотки збудження. Такий магнітопровід одночасно виконує функції демпферної обмотки. Як

правило, в каталогах неявнополюсних синхронних двигунів наводяться залежності від ковзання пускового моменту і струму статора при замкнутій накоротко обмотці збудження, а також параметри обмотки статора R_S , і $X_{\sigma S}$, обмотки збудження R_f , і $X_{\sigma f}$, індуктивний опір розсіювання взаємоіндукції X_{md} , а також номінальна потужність P_H , номінальний струм I_H і напруга U_H статора, номінальний струм обмотки збудження I_{fH} , ККД і $\cos\varphi_H$.

З огляду на магнітну симетрію тіла ротора неявнополюсного синхронного двигуна можна вважати параметри еквівалентного демпферного масиву однаковими в будь-якій осі. Тому схеми заміщення по осях d і q будуть відрізнятися лише наявністю по осі d контуру кола збудження і матимуть такий самий вигляд, як і заступні схеми синхронного явнополюсного двигуна (рис. 1.)

Активний опір обмотки збудження в паспорті задано при температурі 15°C , тому його спочатку необхідно перерахувати до температури 75°C а потім привести до базисних одиниць.

Активні та індуктивні опори обмотки ротора по осях d і q для будь-якого значення ковзання визначаються за відомими вхідними опорами двигуна для заданого значення ковзання. Активний та індуктивний вхідні опори двигуна визначимо як:

$$R_{BX}^{розр}(s) = R_S + 0.5 \cdot (\text{Re}(Z_{2d}(s)) + \text{Re}(Z_{2q}(s))) \quad (7)$$

$$X_{BX}^{розр}(s) = X_{\sigma S} + 0.5 \cdot (\text{Im}(Z_{2d}(s)) + \text{Im}(Z_{2q}(s))) \quad (8)$$

де:

$$Z_{2d}(s) = \frac{1}{\frac{1}{j \cdot X_{md}} + \frac{1}{\frac{R_f}{s} + j \cdot X_{\sigma f}} + \frac{1}{\frac{R_{rd}(s)}{s} + j \cdot X_{\sigma rd}(s)}}$$

$$Z_{2q}(s) = \frac{1}{\frac{1}{j \cdot X_{mq}} + \frac{1}{\frac{R_{rq}(s)}{s} + j \cdot X_{\sigma rq}(s)}}$$

З іншої сторони, якщо відомі паспортні дані, активний і індуктивний вхідні опори двигуна можуть бути визначені як:

$$R_{BX}^{паспорт}(s) = R_S + M_{\Pi}(s) \cdot \cos\varphi_H \cdot \eta_H \cdot \frac{1}{I_{\Pi}^2} \quad (9)$$

$$X_{BX}^{паспорт}(s) = \sqrt{\frac{1}{I_{\Pi}^2} - R_{BX}(s)^2} \quad (10)$$

Між активними і індуктивними опорами ротора по осях d і q існують співвідношення, практично постійні для всіх значень ковзання, які мають вигляд:

$$R_{rq} = C_R \cdot R_{rd}$$

$$X_{\sigma rq} = C_X \cdot X_{\sigma rd}$$

Оскільки значення коефіцієнтів C_R і C_X є близькими до одиниці, то можна прийняти такі припущення:

$$R_{rq}(s) = R_{rd}(s) = R_K(s) \quad (11)$$

$$X_{\sigma rq}(s) = X_{\sigma rd}(s) = X_K(s) \quad (12)$$

$$X_{mq} = X_{md} = X_{\sigma f} \quad (13)$$

З урахуванням припущень (11 - 13) кількість невідомих у рівняннях (7) і (8) скорочується до двох і, використовуючи вирази для знаходження вхідних опорів за паспортними даними (9) і (10), можемо скласти систему алгебраїчних рівнянь з двома невідомими $R_K(s)$ і $X_K(s)$ для кожної точки ковзання. Така система має вигляд:

$$f_R(R_K(s), X_K(s)) = R_{BX}^{наспорм}(s) - R_S - 0.5 \cdot (\operatorname{Re}(Z_{2d}(s)) + \operatorname{Re}(Z_{2q}(s))) \quad (14)$$

$$f_X(R_K(s), X_K(s)) = X_{BX}^{наспорм}(s) - X_{\sigma S} - 0.5 \cdot (\operatorname{Im}(Z_{2d}(s)) + \operatorname{Im}(Z_{2q}(s))) \quad (15)$$

Систему нелінійних алгебраїчних рівнянь (14 - 15) можна розв'язати одним з чисельних методів за умови мінімізації цільової функції:

$$f_{\min}(R_K(s), X_K(s)) = f_R^2(R_K(s), X_K(s)) + f_X^2(R_K(s), X_K(s))$$

Також значення параметрів контурів ротора $R_K(s)$ і $X_K(s)$ замість вирішення нелінійної системи алгебраїчних рівнянь можуть бути визначені аналітично за формулами:

$$Z_K(Z_S, Z_m, Z_f, Z_{BX}, s) = \frac{Z_f \cdot (Z_S - Z_{BX}) + 0.5 \cdot Z_m \cdot (Z_S - Z_{BX} + Z_f - \sqrt{(Z_S - Z_{BX})^2 - Z_f^2})}{(Z_{BX} - Z_S - 0.5 \cdot Z_m) + Z_m^{-1} \cdot Z_f \cdot (Z_{BX} - Z_S - Z_m)} \quad (16)$$

де:

$$Z_S = R_S + j \cdot X_{\sigma S}$$

$$Z_m = j \cdot X_{ad}$$

$$Z_f = \frac{R_f}{s} + j \cdot X_{\sigma f}$$

$$Z_{BX} = R_{BX}^{кам}(s) + j \cdot X_{BX}^{кам}(s)$$

Отримані дані нелінійних залежностей активних і індуктивних опорів ротора в результаті розрахунків за формулами (14 - 16) апроксимуються кубічними сплайнами, що в подальшому дозволяє використовувати їх при розрахунку статичних і динамічних характеристик.

Висновки. 1. У статті розглянуто питання визначення параметрів заступних схем явнополюсного і неявнополюсного синхронних двигунів.

2. Показано, як здійснюється приведення математичних моделей таких двигунів до трифазної системи координат а, b, с.

3. Наведені математичні моделі дозволяють аналізувати перехідні процеси в системах електропостачання від яких живляться різні типи двигунів, в тому числі процеси роботи швидкого автоматичного вводу резерву. Отримані результати можуть бути використані для розробки нових серій синхронних двигунів, а також для розробки мікропроцесорних пристроїв швидкого автоматичного вводу резерву.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Под ред. Л.Г. Мамиконянца. - 4-ое изд. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 240 с.
2. Мощинский Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным / В.Я. Беспалов, А.А. Кириякин – Электричество – 1998. – №4. – С. 38-42.
3. Артишевская С.В. Экспериментально-аналитический метод определения параметров асинхронных машин / – Электричество. – 1999. – №11. – С. 29-31.
4. Сивокобыленко В. Ф., Лисенко В.А Математичне моделювання режимів перемикання на резервне живлення асинхронних двигунів Наукові праці Донецького національного технічного університету. Покровськ. Серія «Електротехніка і енергетика» №1(21) 2019р. с.70 - 83.
5. Виноградов А.Б. Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом электроприводе / А.Б. Виноградов – Электротехника.–М.– 2005. – №5. – С. 57-61.
6. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К. Определение параметров схем замещения и характеристик синхронных турбодвигателей // Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія «Електротехніка і енергетика» 2014 №1(16) с. 189-193
7. Лютер Р.А. Расчёт синхронных машин/ - Л.: Энергия, 1979. -272 р.
8. Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем. – СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2006. – 369 с.
9. Гамазин С.И., Ставцев В.А., Цырук С.А. Переходные процессы в системах электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой. – М. Изд-во МЭИ, 1997. – 421с.

REFERENCES

1. Syromiatnykov Y.A. (1984) *Rezhymy raboty asynkhronnykh i synkhronnykh dvigatelei* [Operating modes of asynchronous and synchronous motors] 4 ed., Enerhoatomyzdat, Moscow, Russia.
2. Moshchynskyi Yu.A. (1998) "Determining the parameters of the equivalent circuit of an asynchronous machine according to catalog data" *Elektrychestvo*, vol. 4 pp. 38-42.
3. Artyshevskaya S.V. (1999) "Experimental and analytical method for determining the parameters of asynchronous machines" *Elektrychestvo*, vol. 11 pp. 29-31.
4. Syvokobylenko, V. F. and Lysenko V. A. (2019) «Mathematical modeling of transients for backup power supply of induction motor» *Zbirnyk naukovykh prats DVNZ «Donetskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet». Seriya «Elektrotekhnika i enerhetyka»*, Pokrovsk. – vol. 1(21) pp.70 - 83. (Ukr)
5. Vynohradov A.B. (2005) "Accounting for steel losses, saturation and surface effect when modeling dynamic processes in a frequency-controlled electric drive" *Elektrotekhnika*, Volume 5 pp. 57-61.
6. Sivokobylenko V.F and Lebedev V.K. (2014) «Determination of equivalent circuit parameters and characteristics of synchronous motors with massive rotor» *Zbirnyk naukovykh prats DVNZ «Donetskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet». Seriya «Elektrotekhnika i enerhetyka»*, Pokrovsk. – vol. 1(16) pp.189 - 193. (Ukr)
7. Liuter R.A. (1979) *Raschët synkhronnykh mashyn* - L.: Enerhiya, -272 c.
8. Meleshkyn H.A., Merkurev H.V. (2006) *Ustoichyvost enerhosystem*. – SPb.: NOU «Tsentr podhotovky kadrov enerhetyky». – 369 p.
9. Hamazin S.Y., Stavtsev V.A., Tsyruk S.A. *Perekhodnye protsessy v systemakh elektrosnabzheniya, obuslovlennye elektrodvigatelei nahruzkoi*. – M. Izd-vo MEI, 1997. – 421s.

Надійшла до редколегії 22.09.2020

Рецензент: Нікіфоров А.П.

V. F. SYVOKOBYLENKO, V. A. LYSENKO

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Analysis of the synchronous motors behavior in the transients for backup power supply. Purpose. Simulation of transient and steady state modes of synchronous motors for the analysis of switching to backup power using mathematical model. **Method.** The methods of linear algebra, numerical optimization methods, methods of modeling and analysis of established and transient modes are used. **Results.** The mathematical model of the salient pole rotor and non-salient or cylindrical pole rotor synchronous motor is presented, which is presented in the form of a alternate scheme, which allows to take into account the effect of displacement of current and saturation of the non-salient pole rotor motor's magnetic core. A method for determining the parameters of the synchronous motor based on passport data is proposed, which allows to improve the accuracy of modeling in steady state and transient modes. The mathematical model is reduced to a three-phase coordinate system a, b, c of the stator winding. The rotor windings are modeled in the coordinates d, q. The results of mathematical modeling allow us to determine the magnitude of the shock currents and mechanical moments of the synchronous motor. It is shown that non-synchronous switching on of the synchronous motor, which occurs in case of automatic transfer switch, can lead to engine damage. Shock currents can also be dangerous to other power supply equipment. Thus, synchronous motors, if transfer switch is used, require synchronization before being connected to the network. **Scientific novelty.** The mathematical model of the synchronous motor was improved taking into account the displacement of current and saturation of the magnetic conduit, the method of determining the parameters of the mathematical model based on the passport data of the engine was improved, which allowed to increase the accuracy of the simulation and the reliability of the simulation results. The modes of power transfer switch are simulated and the values of shock current and shock mechanical moment of the engine are obtained. **Practical meaning.** The mathematical model of the synchronous motor allows to analyze the behavior of synchronous motors in interaction in the power supply system and to identify the dangerous states of synchronous motors that may occur during the transfer switching. The proposed model improves the accuracy of determination of the limits of dangerous states and improves the reliability of synchronous motors and power supply systems.

Keywords: *synchronous motor, transient, transfer switch, power supply system.*