УДК 62-83-52.003

ВПЛИВ ЯКОСТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА ЕЛЕКТРОПРИВОДИ З СИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

О. М. Закладний, О. О. Закладний, кандидати техн. наук, Т. Ю. Оборонов, асп. (НТУУ “КПІ”)

Выполнен анализ влияния качества напряжения питания на электромеханические характеристики синхронных двигателей. Рассмотрено, как влияют такие показатели качества электроэнергии как: отклонение частоты, несинусоидальность, несимметрия и отклонения напряжения на электромеханические свойства двигателей.
Ключевые слова: синхронный двигатель, несимметрия, несинусоидальность, отклонение напряжения, отклонение частоты.

Виконано аналіз впливу якості напруги живлення на електромеханічні характеристики синхронних двигунів. Розглянуто вплив показників якості електроенергії, таких як відхилення частоти, несинусоїдальність, несиметрія та відхилення напруги на електромеханічні властивості двигунів.
Ключові слова: синхронний двигун, несиметрія, несинусоїдальність, відхилення напруги, відхилення частоти.

Influence of power supply voltage quality on electromechanic characteristics of synchronous motors is analyzed. Influence of frequency deviation, unsinusoidality, unsymmetry and voltage deviation on electromechanic properties of motors is considered.
Keywords: synchronous motor, unsymmetry, unsinusoidality, voltage deviation, frequency deviation.

Вступ. Електрична енергія, що використовується у всіх сферах життєдіяльності людини, характеризується сукупністю специфічних властивостей і використовується для створення різних видів продукції, впливаючи на їх якість. Поняття якості електричної енергії (ЯЕ) відрізняється від поняття якості інших видів продукції. Кожен електродвигун призначено для роботи з певними параметрами електричної енергії: номінальними частотою, напругою, струмом тощо, тому для його нормальної роботи повинна бути забезпечена необхідна ЯЕ. Таким чином, якість електричної енергії визначається сукупністю її характеристик, при яких синхронні двигуни (СД) можуть нормально працювати і виконувати закладені в них функції.

ЯЕ в місці виробництва не гарантує її якості в місці споживання. ЯЕ до і після включення СД у точці його приєднання до електричної мережі може бути різною. ЯЕ характеризують також терміном "електромагнітна сумісність" [1]. Проблема електромагнітної сумісності промислових СД з мережею живлення загострилась у зв’язку з поширенням потужних вентильних перетворювачів, які при своїй економічності і технологічній ефективності мають негативний вплив на ЯЕ.

Мета роботи – визначення факторів впливу на енергоефективність і технічний стан електромеханічних систем з синхронними двигунами.

Викладення основного матеріалу. Основною причиною виникнення аварій і низької енергоефективності електромеханічних систем є неврахування впливу якості напруги живлення та режиму навантаження, недостатній обсяг інформації про технічний стан, відсутність ефективного безперервного захисту двигунів, несвоєчасне виявлення і усунення дефектів устаткування, неякісний ремонт, недостатній рівень експлуатації тощо (рис. 1).

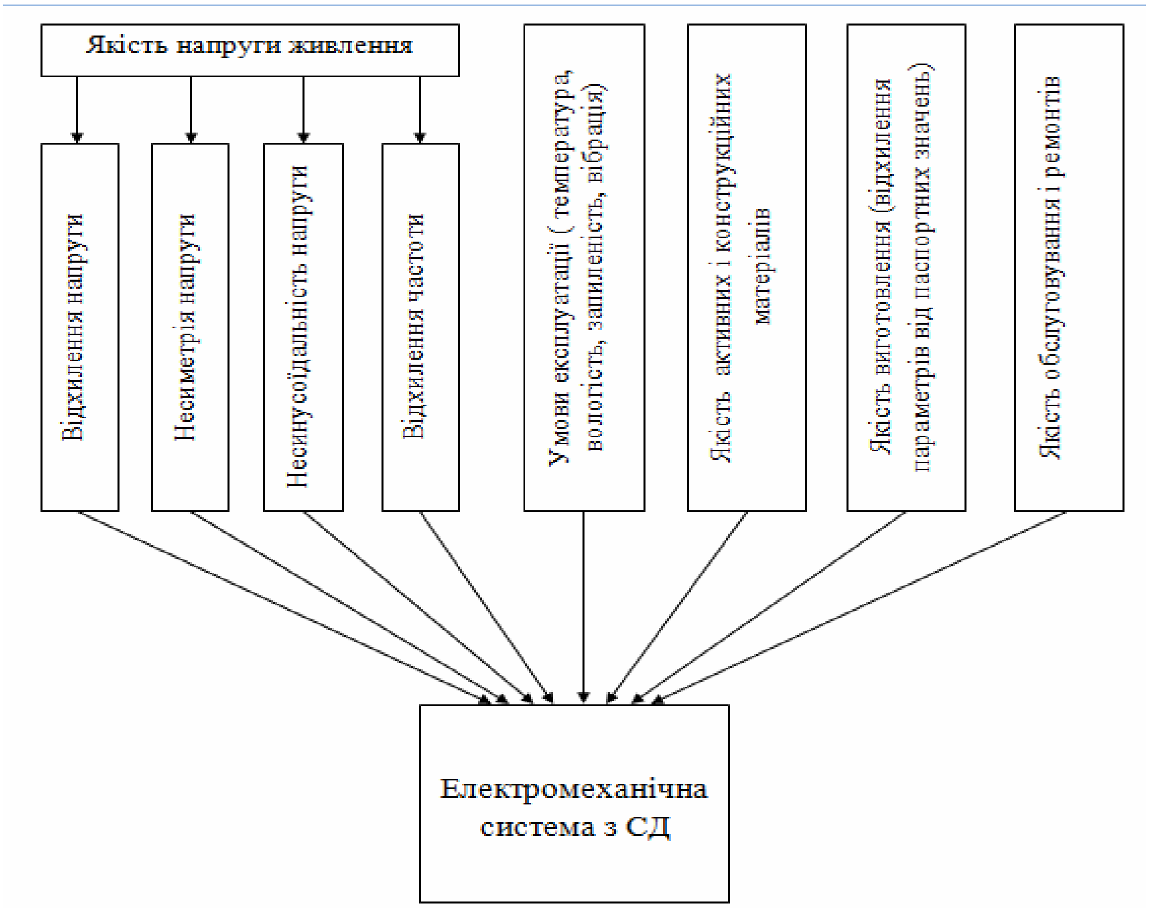


Рис. 1. Фактори впливу на енергоефективність та технічний стан ЕМС з СД

Несинусоїдальність напруги характеризується:

Коефіцієнтом несинусоїдності кривої напруги $k_{\text{НС}}$

$$k_{\text{НС}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} U_{(n)}^2}}{U_{\text{ном}}} 100,$$

де $U_{(n)}$ – діюче значення n-ої гармонічної складової напруги, В; n – порядок гармонічної складової напруги; N – порядок останньої з гармонічних складових напруги, стандартом встановлюється $N = 40$; $U_{\text{ном}}$ – діюче значення напруги, В.

Коефіцієнтом n-ої гармонічної складової напруги $k_{u(n)}$

$$k_{u(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{\text{ном}}} 100.$$

Стандарт дозволяє не враховувати гармонічні складові порядків понад 40 або ті, значення яких менші за 0,3 %.

Запишемо математичну модель синхронного двигуна при несинусоїдальній напрузі живлення (на рис. 2 зображено модель СД з урахуванням несинусоїдальності напруги в середовищі matlab) [7]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{cA}}{dt} = u_{cA} - \frac{1}{3}((4R_{cA} - R_{cC})i_{cA} + (R_{cB} - R_{cC})i_{cB}); \\ \frac{d\psi_{cB}}{dt} = u_{cB} - \frac{1}{3}((R_{cA} - R_{cC})i_{cB} + (4R_{cB} - R_{cC})i_{cB}); \\ \frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f i_f; \frac{d\psi_d}{dt} = -R_d i_d; \frac{d\psi_q}{dt} = -R_q i_q; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p_0^2}{J}\sqrt{3}(\psi_{cA} i_{cB} - \psi_{cB} i_{cA}) - \frac{p_0 M}{J}; \frac{d\gamma}{dt} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

де ψ – потокозчеплення обмотки статора; u_c, i_c, R_c – напруга, струм і резистивні опори окремих фаз статора; p_0 – кількість пар полюсів машини; J – момент інерції; M – механічний момент; γ – кут повороту ротора.

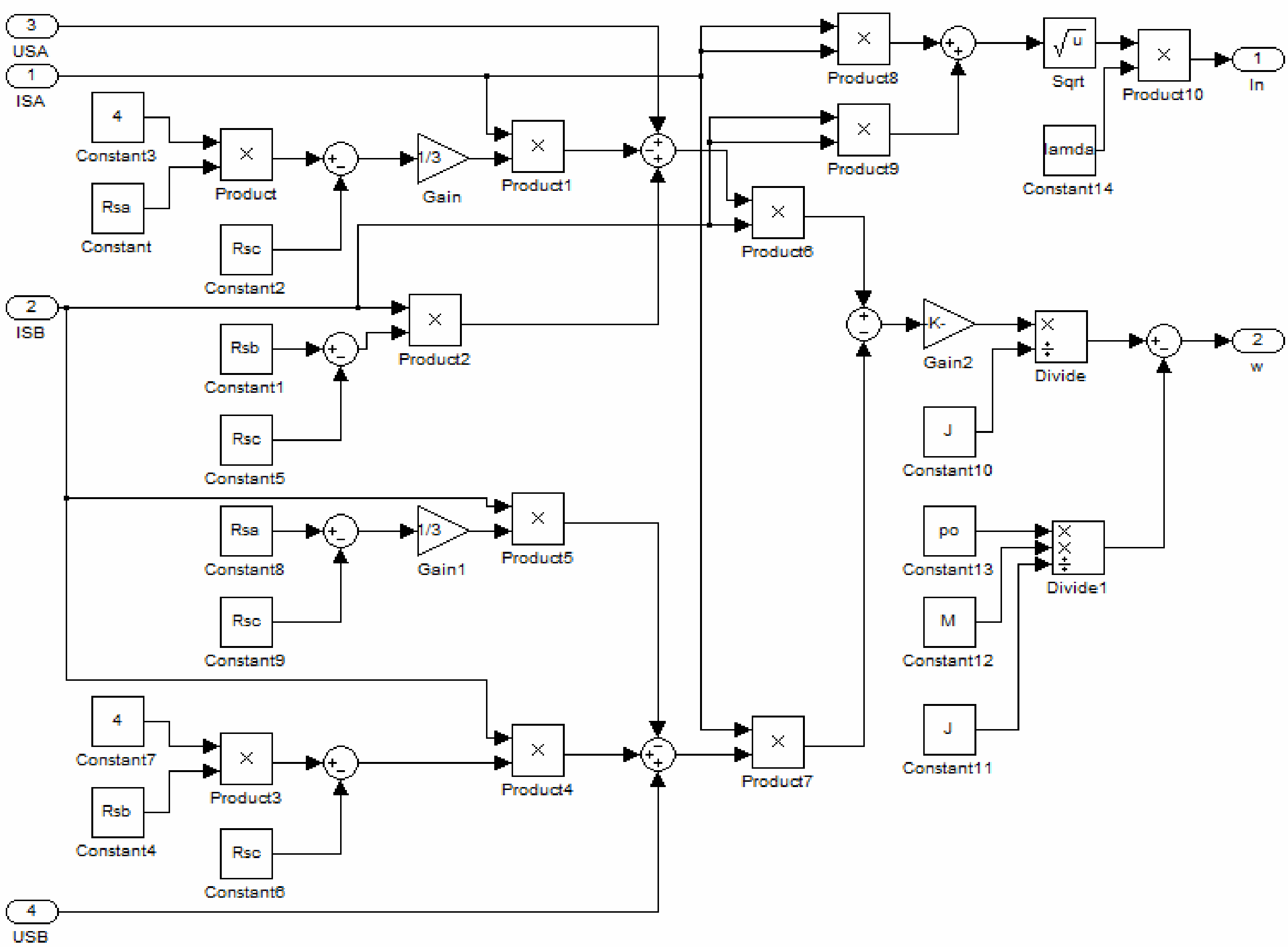


Рис. 2. Модель синхронного двигуна з урахуванням несинусоїдальності напруги в середовищі matlab

У наведеній моделі (1) параметри СД не залежать від частоти живильної напруги. Згідно з вимогами ГОСТ 13109-97 коефіцієнт ν-ї гармонічної складової напруги не повинен перевищувати 5 % [2].

На рис. 3 зображено часові діаграми пускового струму та швидкості за результатами комп’ютерного моделювання.

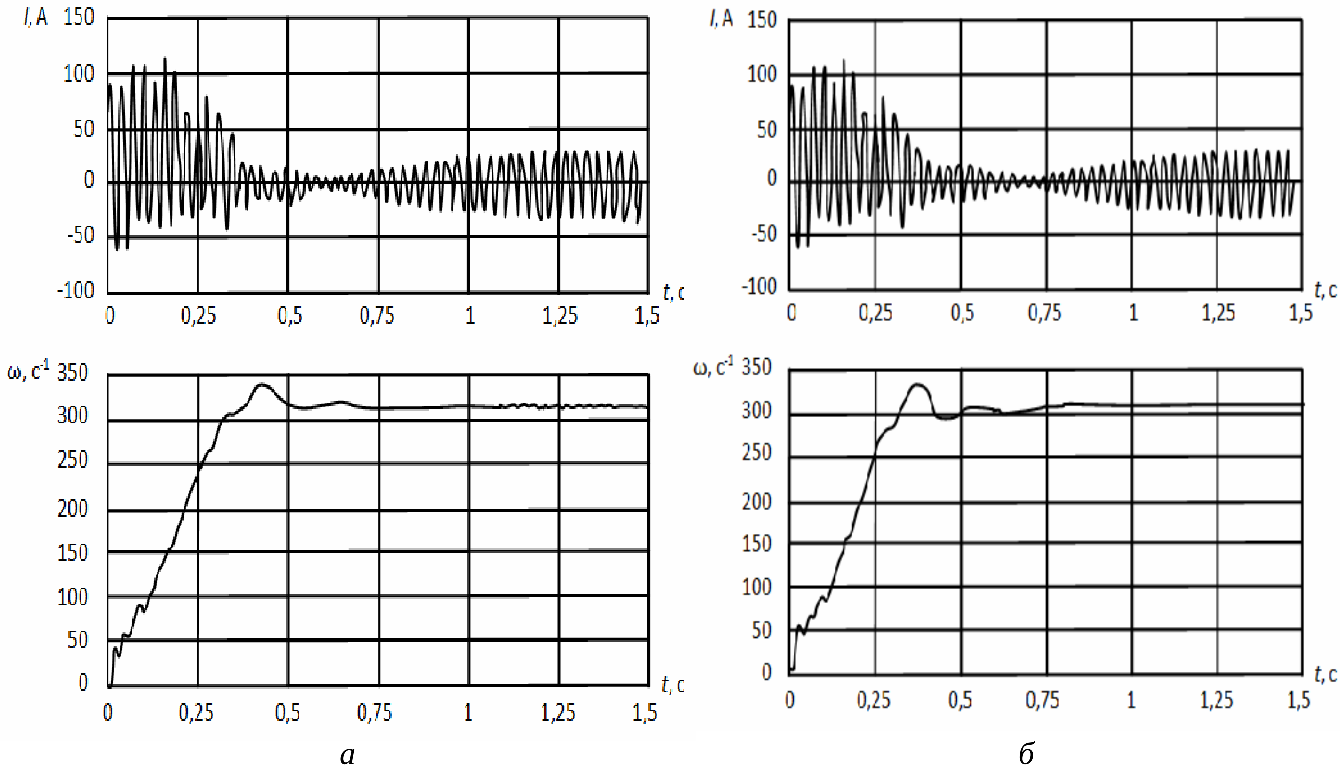


Рис. 3. Результати моделювання синхронного двигуна: *а* – $\nu = 2$; *б* – $\nu = 11$

Проведені розрахунки показують, що наявність вищих гармонік напруги призводить до виникнення коливань швидкості в усталеному режимі, а отже, до погіршення ефективності роботи електропривода.

Відхилення напруги – це різниця між дійсним і номінальним значеннями напруги:

$$\delta U = U - U_{\text{ном}}; \quad \delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 .$$

В умовах нормальної роботи на затискачах електродвигунів та апаратів для їх пуску та управління відхилення напруги від номінального значення допускаються в межах від –5 до +10 %. У післяаварійних режимах допускається додаткове зниження напруги на 5 %.

Збільшення напруги призводить до зростання струму намагнічування двигуна з боку статора і зниження індуктивного опору взаємної індукції по поздовжній осі x_{ad} двигуна в порівнянні з номінальним режимом:

$$x_{ad} = \frac{k_{ad} F_a}{k_U F_{\delta 0}} = \frac{0{,}9 k_{ad} m I_{\text{ном}} k_p \dfrac{\omega_1 k_{01}}{p}}{k_U F_{\delta 0}} ,$$

де k_{ad} – коефіцієнт для переходу від обмотки якоря до обмотки збудження; $F_{\delta 0}$ – магнітна індукція в зазорі; ω_1 – число послідовно з'єднаних витків, яким при цьому магнітному потоці визначається значення ЕРС у фазі обмотки; k_{01} – обмотковий коефіцієнт; k_U – відносне значення напруги.

Зі зменшенням значення x_{ad} знижується і опір $x_d = x_{ad} + x_\tau$. Це, в свою чергу, викликає [3] непропорційне зниження струму збудження

$$I_{з*}^2 = \frac{1 + k_p^2 x_d^2 \cos^2 \varphi_{\text{ном}} + a^2 x_d^2 \sin^2 \varphi_{\text{ном}} + 2 a x_d \sin \varphi_{\text{ном}}}{1 + x_d^2 + 2 x_d^2 \sin \varphi_{\text{ном}}}, \quad (2)$$

де $k_p = P / P_{\text{ном}}$, $\alpha = Q / Q_{\text{ном}}$ – відносні навантаження статора відповідно за активною та реактивною потужністю; x_d – опір двигуна по поздовжній осі, відповідне насичення магнітного кола при холостому ході і номінальній напрузі статора.

Для синхронних електродвигунів, згідно з (2), збільшення напруги на 10 % приводить до відповідної залежності складової індуктивного опору двигуна по поздовжній осі полюсів x_{ad} від завантаження двигунів активною потужністю k_p

$$x_{ad} = \frac{0{,}9 k_{ad} m I_{\text{ном}} k_P \dfrac{\omega_1 k_{01}}{p} I_{\text{ном}} k_p}{1{,}1 F_{\delta 0}} = 1{,}091 k_p,$$

де $1{,}1F_{\delta 0}$ – магнітна напруга повітряного зазору для напруги, що дорівнює $1{,}1U_{\text{ном}}$.

Тоді при характерному завантаженні синхронних двигунів активною потужністю k_P = 0,7…0,85 значення x_d змінюватимуться в межах 0,903…1,066, струми збудження, визначені за (2), необхідно підтримувати в межах 0,878…0,923 від номінального значення.

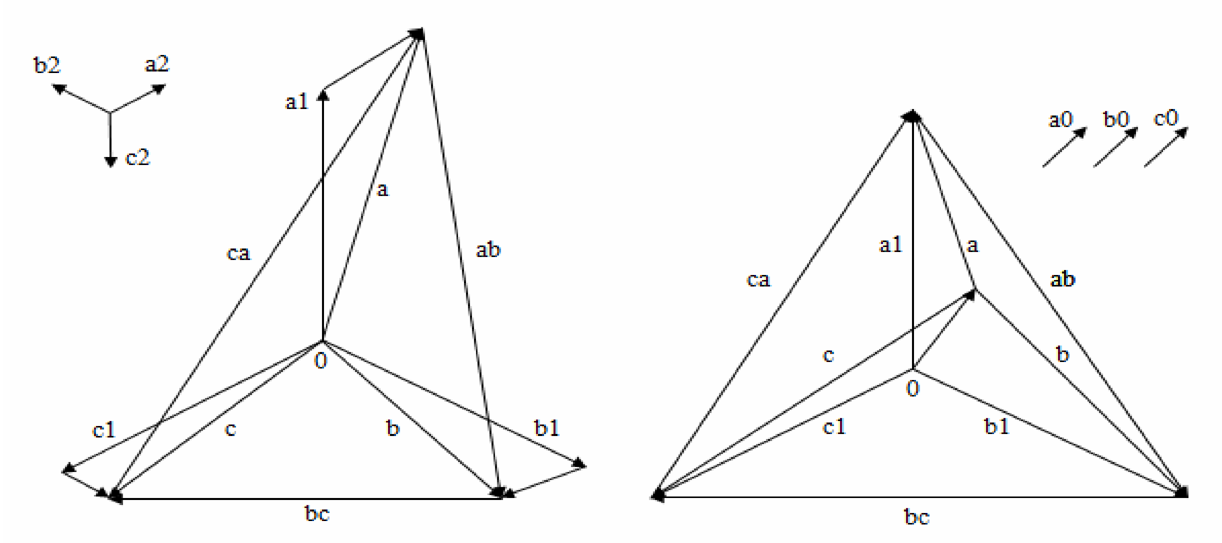
Значний вплив спричиняють відхилення напруги на термін служби синхронного двигуна (термін служби скорочується при зниженні напруги і великому завантаженні двигуна). У цьому випадку збільшується струм двигуна і відбувається більш інтенсивне старіння ізоляції. Так, при номінальному завантаженні двигуна та відхиленні напруги на затискачах на 10 % строк його служби скорочується вдвічі.

Несиметрія напруг. При несиметрії напруг мережі в синхронних машинах поряд з виникненням додаткових втрат активної потужності і нагріванням статора і ротора можуть виникнути небезпечні вібрації внаслідок появи знакозмінних обертаючих моментів і тангенціальних сил, пульсуючих з подвійною частотою мережі. При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, а особливо – за недостатньої міцності та наявності дефектів зварних з'єднань. При несиметрії струмів, що не перевищує 30 %, небезпечні перенапруги в елементах конструкцій, як правило, не виникають. При несиметрії напруг у 2% строки служби синхронних двигунів скорочуються на 16,2 %.

Як міру несиметрії напруг використовують коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності $k_{2U,}$ який дорівнює відношенню напруги зворотної послідовності $U_{зв}$ до напруги прямої послідовності $U_{пр}$ [2]:

$$k_{2U} = \frac{U_{зв}}{U_{пр}} 100\,\%\,.$$

Несиметрія трифазної системи напруг виникає в результаті накладення на систему прямої послідовності напруг системи зворотної послідовності, що призводить до зміни абсолютних значень фазних і міжфазних напруг (рис. 4, *а*). Крім несиметрії, що викликається напругою системи зворотної послідовності, може виникати несиметрія від накладання на систему прямої послідовності напруг системи нульової послідовності. В результаті зсуву нейтралі трифазної системи виникає несиметрія фазних напруг при збереженні симетричної системи міжфазних (рис. 4, *б*).



а *б*

Рис. 4. Векторна діаграма напруг: *а* – пряма і зворотня послідовність; *б* – пряма і нульова послідовність

Струм основної частоти являє собою струм зворотної послідовності $\dot{I}_2$ і визначається рівністю [6]:

$$\dot{I}_2 = \frac{Z_{d2} + Z_{q2}}{2Z_{d2}Z_{q2}} \dot{U}_2 \text{ТВ}\,.$$

Відносне значення струму знижується при збільшенні тривалості ввімкнення. В результаті великі темпи зростання струмів в обмотках електродвигуна при несиметрії мережі спостерігаються при збільшенні тривалості ввімкнення (рис. 5).

Відхилення частоти. Під відхиленням частоти розуміють різницю між дійсним і номінальним значеннями основної частоти

$$\Delta f = f - f_{ном}\,; \quad \Delta f = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} 100\,.$$

У нормальному режимі роботи енергосистеми допускають відхилення частоти, усереднені за 10 хв, в межах від –0,1 Гц до +0,1 Гц. Допускається тимчасова робота системи з відхиленням частоти, усередненим за 10 хв, в межах від –0,2 Гц до +0,2 Гц.

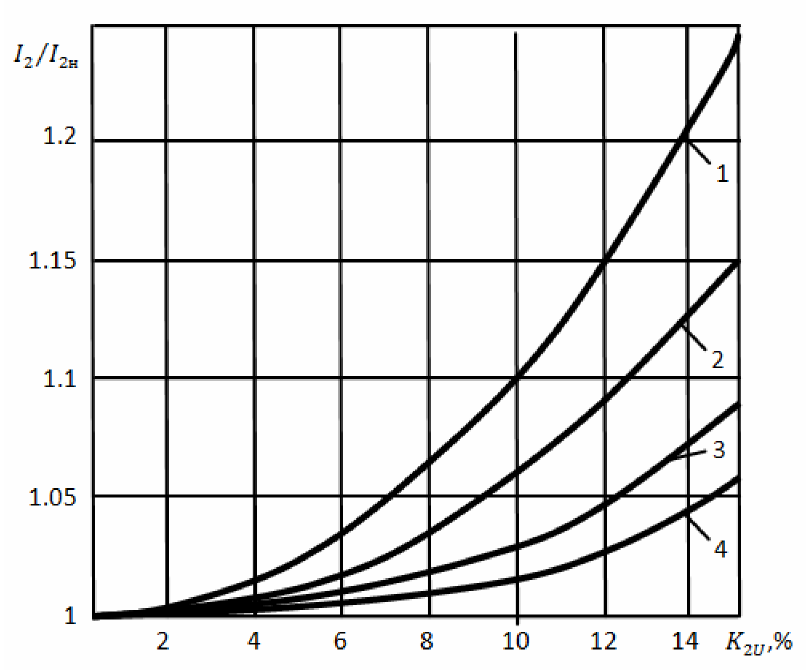


Рис. 5. Графіки залежності струму зворотної послідовності для різної тривалості ввімкнення: *1* – ТВ = 1; *2* – ТВ = 60 %; *3* – ТВ = 40 %; *4* – ТВ = 25 %

Розмах коливань частоти – різниця між найбільшим і найменшим значеннями частоти за певний проміжок часу

$$\delta f = f_{Нб} - f_{НМ}; \quad \delta f = \frac{f_{Нб} - f_{НМ}}{f_{ном}} 100 .$$

Під коливанням частоти розуміють її зміну, що відбувається зі швидкістю 0,2 Гц за секунду. Розмах коливань частоти не повинен перевищувати 0,2 Гц.

Намагнічувальний струм СД збільшується при зменшенні частоти і зменшенні x_{ad} зі зростанням насичення, обумовленим збільшенням магнітного потоку [4].

$$I_*^2 = k_f \left(\beta^2 \cos^2 \varphi_{ном} + a^2 \sin^2 \varphi_{ном}\right). \qquad (3)$$

Струм статора і реактивна потужність. Зміна частоти викликає зміну активної та реактивної складових струму статора. Як видно з (3), при заданому навантаженні на валу активна складова змінюється обернено пропорційно напрузі мережі, реактивна – за більш складним законом, оскільки при зміні напруги змінюється α. Визначимо зміну реактивної складової струму статора з урахуванням зміни насичення:

$$\left(\frac{I_{3f}}{I_{3.\text{ном}}}\right)^2 = \left(\frac{k_{3x}}{k_\mu}\right)^2 \left[\left(\frac{1}{k_f}\right)^2 + \frac{2x_d \sin\varphi_{\text{ном}}}{k_f}\alpha + a^2 x_d^2 \sin^2\varphi_{\text{ном}} + \beta^2 x_d^2 \cos^2\varphi_{\text{ном}}\right]. \quad (4)$$

Після розв’язання (4) відносно α знайдемо реактивну потужність в частках номінальної реактивної потужності (рис. 6):

$$\alpha = \frac{\sqrt{\left(\frac{k_{3f} k_\mu}{k_{3x}}\right)^2 - (\beta x_d \cos\varphi_{\text{ном}})^2} - \frac{1}{k_f}}{x_d \sin\varphi_{\text{ном}}}. \quad (5)$$

Рівняння (5) наочно показує, що при зниженні частоти і незмінному струмі збудження реактивна потужність, що видається в мережу, зменшується. За наявності автоматичного регулятора збудження струм збудження буде збільшуватися, відповідно зросте і реактивна потужність, що видається в мережу [5].

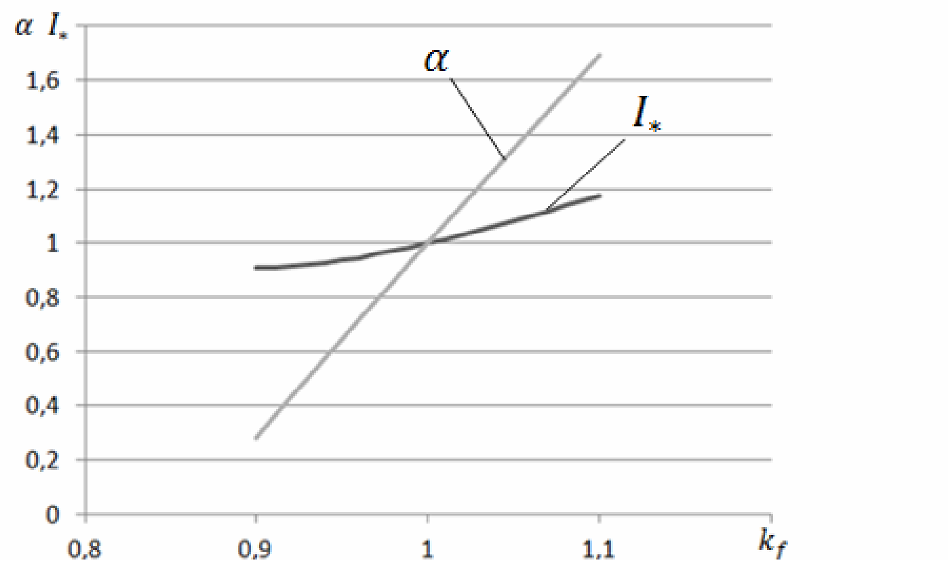


Рис. 6. Залежність реактивної потужності (α) і струму статора (I_*) синхронного двигуна від частоти і напруги

Виконані розрахунки наочно показали дуже несприятливу залежність реактивної потужності від частоти за відсутності автоматичного регулювання збудження: при зниженні частоти на 5 % реактивна потужність, що віддається двигуном в мережу, зменшується на 30 %.

Висновки

Встановлено, що відхилення частоти, несинусоїдальність, несиметрія та відхилення напруги – значущі фактори впливу на електромеханічні системи із синхронними двигунами.

Розглянуто вплив показників якості електроенергії на електромеханічні характеристики синхронних двигунів. Наявність вищих гармонік напруги призводить до виникнення коливання швидкості в усталеному режимі, а отже, до погіршення енергоефективності роботи електропривода. Встановлено, що відносне значення струму зворотної послідовності знижується при збільшенні тривалості ввімкнення. При зниженні частоти на 5 % реактивна потужність, що віддається двигуном у мережу, зменшується на 30 %.

1. *Праховник А. В.* Діагностування енергоефективності електромеханічних систем як інструмент енергоменеджменту / Праховник А. В., Закладний О. М., Закладний О. О. // Вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Вип. 21. – С. 121–128.

2. *ГОСТ 13109-97*. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введен в Украине с 01.01.2000.

3. *Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины / А. В. Иванов-Смоленский. – М: Энергия, 1980. – 928 с.

4. *Сыромятников И. А.* Режимы работы асинхронных и синхронних двигателей / И. А. Сыромятников // Под ред. Л. Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

5. *Макаричев Ю. А*. Синхронные машины: учеб. пособие / Ю. А. Макаричев, В. Н. Овсянников. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. – 156 с.

6. *Кацман М. М.* Справочник по электрическим машинам: Учебное пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман // – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.

7. *Гадай А. В.* Дослідження математичної моделі синхронного двигуна при несинусоїдній напрузі живлення / А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 2. – С. 56–60

Надійшла до редакції 1.11.2012

Рекомендовано до друку докт. техн. наук В. М. Чермалихом