

Є. В. Харченко
В. Й. Чабан
А. Р. Біловус
А. П. Охримович

ЗБУДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙ РОТОРА І СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА У ПЛОЩИНІ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Національний університет «Львівська політехніка»

Анотація. Розглядаються математичні моделі динамічних процесів в асинхронних двигунах, побудовані на основі урахування взаємозв'язку електромагнітних явищ в електричній машині і механічних коливальних явищ. У першому випадку – для двигунів найбільш поширених конструкцій – приймається, що ротор встановлений у статорі на абсолютно жорстких опорах, а статор на основі – на податливих опорах. При цьому вісь обертання ротора відносно статора є нерухомою. У другому випадку – для спеціальних двигунів великої потужності – розглядається більш складна задача, оскільки приймається, що статор і ротор встановлені на індивідуальних опорах; статор жорстко зв'язаний з основою, а опори ротора характеризуються податливістю у зв'язку з деформівністю валу і підшипникових вузлів. При цьому вісь обертання ротора відносно статора змінює своє положення і повітряний зазор стає функцією кутової координати і часу.

Наводиться результати розрахунків вібраційних процесів у асинхронних двигунах. Ілюструється, зокрема, вплив пружно-дисипативних параметрів опор статора на максимальні значення моментів сил пружності у цих опорах і максимальні кутові переміщення статора.

Ключові слова: асинхронний двигун, нестационарні режими роботи, моделювання механічних та електромагнітних коливальних явищ, вібрації ротора і статора, урахування податливості опор і мінливості повітряного зазору.

Питанням математичного моделювання вібрацій асинхронних двигунів як з постійним, так і зі змінним повітряним зазором у літературі приділяється велика увага. Як відзначається у праці [1], вібраційні явища у двигунах можуть призвести до поломок, несправностей та аномального шуму в електричних машинах. На основі виявлення та аналізу шуму і вібрації можна встановити та усунути несправності двигуна. Це має істотне значення не лише для забезпечення працездатності виробничого устаткування, а й для запобігання нещасним випадкам.

У статті [2] наведено результати досліджень сумісних коливань двигуна, редуктора та рами візка тягового агрегату, що проведені із застосуванням багатовимірних моделей скінченних елементів. Досліджено рівні вібраційної активності елементів транспортувальної машини з урахуванням функціонування системи керування приводом у всьому діапазоні робочих швидкостей.

З метою зниження впливу динамічних навантажень на роботу привідних систем застосовують керування імпедансом. У статті [3] ця задача розв'язується із застосуванням регулятора моменту або регулятора швидкості. Аналіз виконуються в дискретному часі. Порівнюються продуктивність, пасивність та стабільність схем контролерів. Обговорюються емуляція імпедансу, а також властивості затухання динамічних збурень.

Результати дослідження шумів і вібрацій асинхронних двигунів знайшли широке застосування у технічній діагностиці, наприклад, для виявлення несправностей підшипників кочення [4].

У нинішній час існує зростаючий попит на ефективні електродвигуни у різних галузях промисловості, зокрема, у такій галузі як випуск електромобілів [5]. Під час розроблення автомобільних електродвигунів необхідно враховувати їх шум та вібрацію. Електродвигуни, що складаються зі статора та ротора, генерують крутий момент розподілених електромагнітних сил взаємодії елементів двигуна. Оскільки ці сили мають коливальний характер у часі, вони

викликають конструкційну вібрацію як статорів, так і роторів. У згаданій статті наводиться аналіз вимушених коливань асинхронних двигунів в експлуатаційних умовах.

Діагностика несправностей у трифазних асинхронних машинах має вирішальне значення у промисловому середовищі, де для виявлення несправностей перевагу надають неінвазивним методам, таким як акустичний аналіз та термографія. Акустика пропонує практичний та ефективний спосіб ідентифікації специфічних звукових сигнатур, пов'язаних з різними несправностями, без необхідності використання датчиків, встановлених безпосередньо на машині. Несправності типу дисбалансу статора генерують характерні акустичні сигнали, які можна легко проаналізувати. Методи, засновані на інтелектуальній класифікації звуків машин, дають хороші результати у цій галузі. Однак, незважаючи на прогрес, все ж існує потреба у створенні більшої бази даних та кращої класифікації несправностей за різними параметрами.

Точна характеристика впливу кожної несправності, як на машину, так і на її джерело живлення, може поліпшити класифікацію несправностей та посприяти більш ранній та точній діагностиці. Метою статті [6] є вивчення характеристик акустичних сигналів, що подаються незбалансованим трифазним джерелом живлення або джерелом з однією відсутньою фазою для виявлення перших ознак несправності та полегшення їх класифікації на основі акустичних та електричних вимірювань.

У даній доповіді розглядаються математичні моделі динамічних процесів в асинхронних двигунах, побудовані на основі урахування взаємозв'язку електромагнітних явищ в електричній машині і механічних коливальних явищ. У першому випадку – для двигунів найбільш поширених конструкцій – приймається, що ротор встановлений у статорі на абсолютно жорстких опорах, а статор на основі – на податливих опорах. При цьому вісь обертання ротора відносно статора є нерухомою. У другому випадку – для спеціальних двигунів великої потужності – розглядається більш складна задача, оскільки приймається, що статор і ротор встановлені на індивідуальних опорах; статор жорстко зв'язаний з основою, а опори ротора характеризуються податливістю у зв'язку з деформівністю валу і підшипникових вузлів. При цьому вісь обертання ротора відносно статора змінює своє положення і повітряний зазор стає функцією кутової координати і часу.

Наводяться результати розрахунків вібраційних процесів у асинхронних двигунах в період пуску. Ілюструється, зокрема, вплив пружно-дисипативних параметрів опор двигуна на максимальні значення моментів сил пружності опор і максимальні кутові переміщення статора.

На розрахункових прикладах показано, що в період пуску асинхронних двигунів різної потужності виникають інтенсивні коливання електромагнітного моменту з частотою, близькою до частоти коливань напруги у мережі живлення. Відношення максимального значення електромагнітного моменту до номінального для розглянутих типів двигунів знаходиться у межах 3,10 ... 4, 85; зі збільшенням потужності двигуна це відношення зменшується. Зміна жорсткості опор статора у діапазоні реальних значень практично не впливає на часову залежність електромагнітного моменту. Однак, максимальне значення моменту сил пружності опор і максимальний кут повороту статора в режимах, близьких до резонансних, істотно зростають. Вказані величини значною мірою залежать від розсіювання енергії коливань в опорах статора. Для практично обґрунтованих значень коефіцієнтів в'язкого тертя, що характеризують згасання коливань статора, найбільше значення максимального моменту сил пружності опор набагато перевищує максимальний електромагнітний момент.

У цілому, одержані результати засвідчують, що коливання електромагнітного моменту двигуна, обумовлені нестационарними режимами роботи, істотно впливають на віброактивність електричної машини. Періодична зміна повітряного зазору між робочими поверхнями статора і ротора може істотно підвищити рівень вібрацій ротора. Нестационарні електромеханічні процеси у двигунах в режимах, наближених до резонансних, слід вважати вкрай небажаними, що вказує на необхідність їх прогнозування під час проєктування електричних машин і приводних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhongjie Wang, Jingnan Zhang, Yongchun Liang. Motor Noise and Vibration Test Research. TELKOMNIKA, Vol.11, No.1, March 2013, pp. 87-94.

2. Genadijs Kobenkins, Marks Marinbahs, Anatolijs Bizans, Nikita Rilevs, Oleg Sliskis. The influence of dynamic loads on the vibration level of rotating units of traction drives. Energy Reports. Volume 9, Supplement 3, May 2023, Pages 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.12.114>

3. Mohamad Mosadeghzad, Gustavo A Medrano-Cerda, Jody A Saglia, Nikos G Tsarakis and Darwin G Caldwell. Impedance control of a class of series elastic actuators: performance limitations arising from link dynamics, disturbance attenuation and impedance emulation. Technical Report. February 2014. Report number: This report is an extended version of the Conference paper: Impedance Control with inner PI Torque Loop: Disturbance Attenuation and Impedance Emulation, IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Dec 12-14, 20, Affiliation: Istituto Italiano di Tecnologia. DOI: 10.13140/2.1.511.4249

4. Zuolu Wang, Dawei Shi, Yuandong Xu, Dong Zhen, Fengshou Gu, Andrew D. Ball. Early rolling bearing fault diagnosis in induction motors based on on-rotor sensing vibrations. Measurement. Volume 222, 30 November 2023, 113614. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113614>

5. Akira Saito, Tatsuya Suzuki. Forced response vibration analysis of induction motor stators induced by electromagnetic forces. IFAC-PapersOnLine. Volume 55, Issue 27, 2022, Pages 155-159. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.504> Get rights and content

6. Abderrahman El Idrissi, Aziz Derouich, Said Mahfoud, Najib El Quanjli, Ahmed Chantoufi, Youness El Mourabit. Acoustic characterization of a three-phase asynchronous machine under stator unbalance defects. e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy, Volume 12, June 2025, 100958. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2025.100958>

Харченко Євген Валентинович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Опір матеріалів та будівельна механіка», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: yevhen.v.kharchenko@lpnu.ua;

Чабан Василь Йосипович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Теоретична та загальна електротехніка», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: vasyly.tchaban@lpnu.ua;

Біловус Андрій Романович, аспірант, Інститут механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: andrii.r.bilovus@lpnu.ua;

Охримович Андрій Петрович, аспірант, Інститут механічної інженерії та транспорту, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, e-mail: andrii.p.okhrymovych@lpnu.ua.

EXCITATION OF VIBRATIONS OF THE ROTOR AND STATOR OF AN INDUCTION MOTOR IN THE CROSS-SECTIONAL PLANE

Abstract. *Mathematical models of dynamic processes in induction motors are considered, based on the interaction between electromagnetic phenomena in electric engines and mechanical oscillatory phenomena. In the first case, for motors of the most common designs, it is assumed that the rotor is mounted in the stator on completely rigid supports, and the stator is mounted on the base on flexible supports. In this case, the axis of rotation of the rotor relative to the stator is fixed. In the second case, for special high-power motors, a more complex problem is considered, since it is assumed that the stator and rotor are mounted on individual supports; the stator is rigidly connected to the base, and the rotor supports are characterized by pliability due to the deformation of the shaft and bearing assemblies. Thus, the axis of rotation of the rotor relative to the stator changes its position, and the air gap becomes a function of the angular coordinate and time.*

The results of calculations of oscillatory processes in induction motors are presented. In particular, the influence of the elastic-dissipative parameters of the stator supports on the maximum values of the elastic forces in these supports and the maximum angular displacements of the stator are illustrated.

Keywords: *induction motor, non-stationary operating modes, modeling of mechanical and electromagnetic oscillatory phenomena, rotor and stator vibrations, consideration of support stiffness and air gap variations.*

Kharchenko Yevhen, Doctor of Technical Sciences, Professor, Strength of Materials and Structural Mechanics Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: yevhen.v.kharchenko@lpnu.ua;

Chaban Vasyl, Doctor of Technical Sciences, Professor, Theoretical and General Electrical Engineering Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: yevhen.v.kharchenko@lpnu.ua;

Bilovus Andriy, postgraduate, Institute of Mechanical Engineering and Transport, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: andrii.r.bilovus@lpnu.ua;

Okhrymovych Andriy, postgraduate, Institute of Mechanical Engineering and Transport, Lviv Polytechnic National University, Lviv, e-mail: andrii.p.okhrymovych@lpnu.ua.