

Особливості формування динамічних режимів асинхронних двигунів при пуску від одного пристрою

А. О. Бойко, О. В. Найденко, А. А. Савельєв, С. М. Забродський
Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У статті вирішується проблема формування динамічних режимів асинхронних двигунів під час пуску від одного пускового пристрою. Виконано математичний опис процесів відключення від мережі живлення та вибігання асинхронних двигунів. Проведено аналіз форми та величини напруги на комутуючих елементах під час вибігу. Дана оцінка впливу потужності двигунів на перехідні процеси підключення до мережі живлення. Дані рекомендації щодо забезпечення сприятливих умов підключення асинхронних двигунів до мережі живлення з урахуванням можливостей напівпровідникових пускових пристроїв та використання контактної апаратури.

Ключові слова: динамічні режими, асинхронний двигун, підключення до мережі, умови пуску, вибігання двигуна, перехідні процеси, початкові електромагнітні умови.

Вступ

В даний час як пускові пристрої для асинхронних двигунів (АД) використовуються пристрої плавного пуску Soft starter (Тиристорні перетворювачі напруги - ТПН) або перетворювачі частоти (ПЧ). Головними цілями керованого пуску є обмеження пускового струму АД з метою зменшення ударних навантажень у мережах та зменшення динамічних навантажень у механізмах [1]. Вартість пускових пристроїв порівняно висока і тому при нечастих пусках зменшення капітальних витрат застосовують один пусковий пристрій для послідовного пуску декількох приводних асинхронних двигунів. Сучасні програмовані пристрої плавного пуску надають користувачам безліч варіантів пуску для вибору оптимального за заданими технічними умовами. У той же час процес перемикання АД від пускового пристрою на мережу живлення залишається неврахованим і некерованим. При несприятливих поєднаннях початкових електромагнітних умов (ПЕМУ) підключення АД до мережі задані умови процесу пуску можуть бути значною мірою спотворені, хоча візуально процес перемикання може оцінюватися позитивно [2].

1. Аналіз літератури та постановка проблеми

Особливості та неоднозначність перебігу динамічних режимів в АД пов'язана з наявністю

© Бойко А. О., Найденко О. В., Савельєв А. А.,
Забродський С. М., 2025

вторинного контуру-обмотки ротора. За відсутності зовнішніх джерел живлення ланцюга ротора АД енергія ланцюга ротора забезпечується лише з допомогою трансформації її через повітряний зазор із боку статора [3]. Однак, енергія, яка внесена в ланцюг ротора і сконцентрована у формі енергії електромагнітного поля при порушеннях процесу, що встановився, починає грати самостійну роль, впливаючи на величину і форму переходного електромагнітного моменту. У цьому полягає подвійна роль ланцюга ротора в динамічних режимах [4]. Відповідно до принципу дії АД в режимі, що обертається, магнітний потік статора, що обертається, наводить електрорушійні сили (ЕРС) і струми в обмотці ротора і при взаємодії з цими струмами (або магнітним потоком ротора) створює електромагнітний момент [5, 2]. У режимі перетворення енергії, що встановився, зчеплені вектори потоків статора і ротора обертаються з однаковою синхронною швидкістю, але оскільки швидкість ротора менше швидкості поля, потік ротора «повзе» або «ковзає» по ротору. Взаємне просторове положення узагальнених векторів напруг, струмів і потоків добре візуалізується за допомогою векторних діаграм. Стрибокподібна зміна амплітуди або фази напруги живлення, опору в статорі або роторі, скидання або накидання навантаження, в результаті призводить АД до нового режиму, до нових амплітуд векторів і нових їх кутових положень [6]. Однак, відповідно до законів комутації, принципу суперпозиції та принципу

Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk>)

нерозривності поточкозчеплень незнеструмлених контурів після такого стрибка в роторі починають діяти дві системи струмів та магнітних потоків [7]. Одна відповідає умовам нового режиму. Інша визначається вільними складовими струмів та потоків, що виникли при стрибкоподібному впливі. Аналогічні процеси мають місце і в ланцюгах статора, але в роторі вони виражені більш чітко, існують більш тривалий час завдяки більшій електромагнітній інерційності і тому більш впливають на динаміку приводу. Тепер електромагнітне поле статора, що обертається, взаємодіє з двома магнітними полями ротора - новим усталеним, в результаті чого формується постійна складова моменту, і залишковим, що виникли як реакція на стрибкоподібну зміну умов, загасаючим, нерухомим відносно ротора полем, в результаті чого формується періодична, загасаюча складова моменту. Така картина перехідного процесу спостерігається при пуску з нульовими ПЕМУ або при повторних включеннях після деякої паузи.

Якщо статор АД відключається від джерела живлення, то в роторі залишається тільки одна система загасаючих струмів і потоків, нерухома щодо ротора і обертається разом з ним з його швидкістю. Ці відключення можуть відбуватися повністю або частково в окремих фазах, на малих інтервалах часу при комутації вентилів ТПН або великих при повному відключенні, але завжди нове включення викликає новий процес, цього разу вже з ненульовими ПЕМУ. В [9] показано, що при повторних включеннях з ненульовими ПЕМУ характер перехідного моменту (руховий або гальмівний) залежить від кута між узагальненими векторами магнітних потоків «нового» статора і «залишкового» ротора. Амплітуди векторів потоків визначають лише амплітуду перехідного моменту. Частота та постійна часу загасання вільних складових залежать від параметрів двигунів та швидкості ротора, на якому розглядається процес. Незважаючи на простоту, розглянута картина виникнення перехідних процесів багатьма дослідниками представляється недостатньо чітко. Наприклад, [10] про можливість виникнення перехідних моментів та їх інтенсивності судять не за величиною потоку в роторі, а за величиною ЕРС, що наводиться в статорі. В результаті можна зробити некоректні висновки про те, що затухаюче поле мало не впливає на електромагнітні перехідні процеси при низьких швидкостях двигуна.

2. Постановка проблеми та методи вирішення

При дослідженнях динамічних та енергетичних процесів в асинхронному електроприводі важливо враховувати, що:

- будь-які стрибкоподібні зміни керуючих або обурювальних впливів викликають в асинхронному електроприводі перехідний процес, що супроводжується збудженням перехідних струмів, магнітних потоків і моментів;

- інтенсивність перехідного процесу та момент, що при цьому розвивається, залежить від початкових ПЕМУ процесу; чим більше відрізняються ПЕМУ від умов режиму, тим сильніше виявляються перехідні процеси, незалежно від поточної швидкості ротора;

- мінімальні прояви перехідного моменту в будь-яких процесах будуть спостерігатися при плавній зміні керуючого впливу (кута включення вентилів і, відповідно, вихідної напруги перетворювача);

- мінімальні прояви перехідного моменту в будь-яких процесах будуть спостерігатися також при стрибкоподібному зміні управляючого впливу, якщо ПЕМУ в момент комутації близькі до електромагнітних умов нового режиму;

- при моделюванні процесу відключення однієї або декількох фаз обмотки статора, з метою правильного відображення поточних електромагнітних умов АД, слід суворо витримувати принцип нерозривності поточкозчеплення нерозімкнених і невідключених контурів.

У цій роботі розглядаються процеси, що протікають при вибігу АД і при переключенні на мережу з можливістю управління цими процесами. Дослідження проводилися методом математичного моделювання із застосуванням авторських моделей асинхронного електроприводу [11]. Для поставлених цілей дослідження асинхронний двигун представлявся з урахуванням узагальненої машини, що описується у системі координат α , β . У моделі вченого насичення стали по коліях головного магнітного потоку та шляхах розсіювання, також ефект витіснення струму в стрижнях обмотки ротора.

Завдання досліджень:

- оцінка впливу швидкості на процес підключення до мережі за нульових початкових електромагнітних умов;

- оцінка впливу ненульових ПЕМУ та визначення сприятливих та несприятливих умов підключення АД до мережі при ненульових ПЕМУ;

- оцінка впливу потужності двигуна на перехідні процеси підключення до мережі;

- аналіз форми та величини напруги на комутуючих елементах під час вибігу АД різної потужності та типовиконання.

3. Основний матеріал дослідження

3.1. Підключення двигуна до мережі з нульовими ПЕМУ

Підключенню до мережі передують робота пускового пристрою, тому має місце процес вибігу, протягом якого швидкість двигуна може значно знизитися, аж до повної зупинки [12]. Відносно великий час вибігу може також призводити до повного згасання магнітного потоку ротора. Тому граничним випадком підключення АД до електричної мережі є повторне включення з нульо-

вими ПЕМУ. На рис. 1 наведені осцилограми повторного включення АД при різних ковзаннях. З метою оцінки впливу потужності АД на перехідні процеси підключення до мережі аналіз проводився для двигунів трьох різної потужності 4, 55 і 315 кВт. Всі величини на осцилограмах представлені у відносних одиницях, де за базу прийняті номінальний момент, амплітуда номінального струму та синхронна швидкість двигуна. Оскільки найбільший інтерес представляють амплітуди струму і моменту в початковій фазі включення, на рис. 1 показані лише перші 10 періодів після включення.

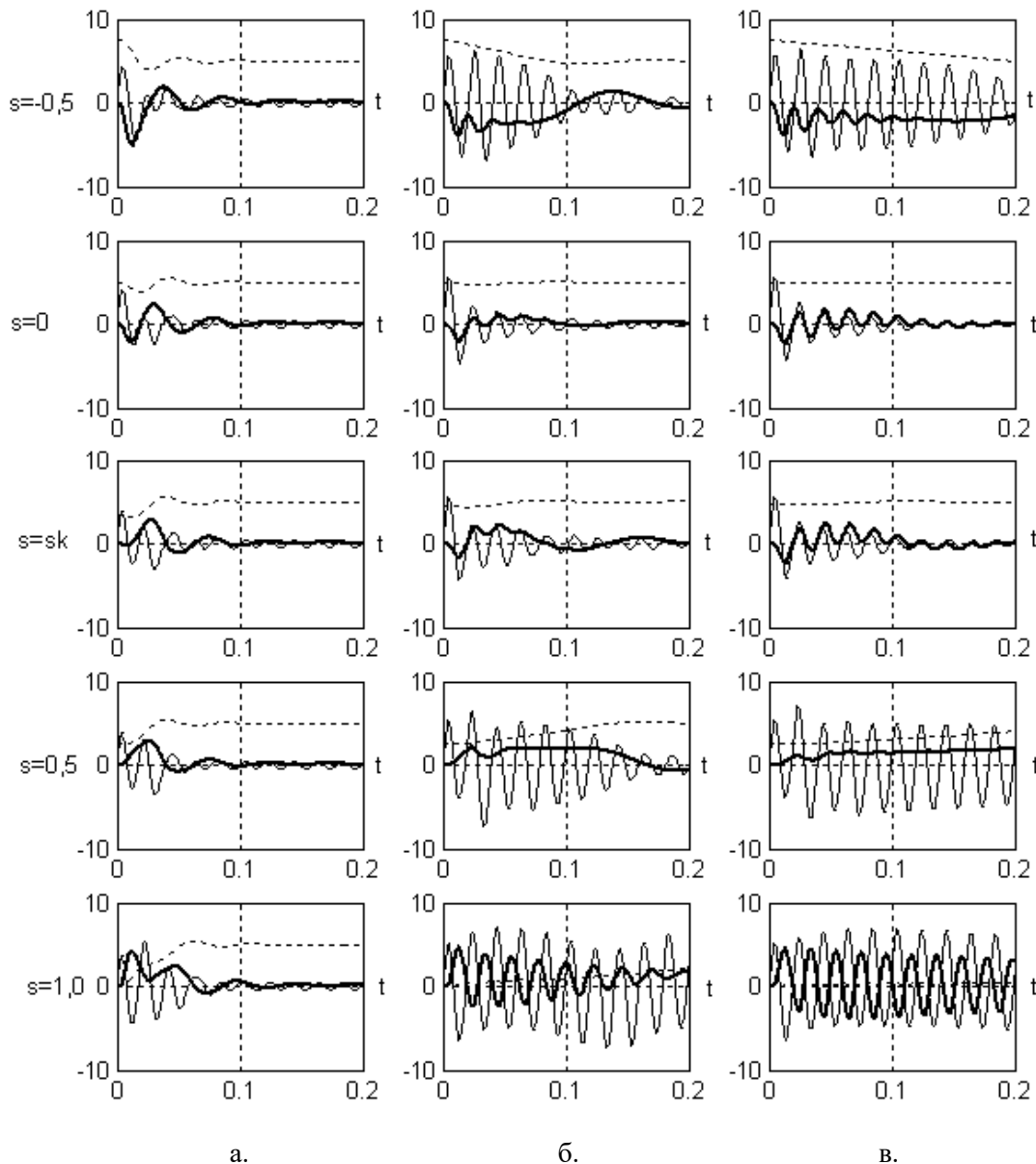


Рис. 1. Осцилограми повторного включення АД з нульовими ПЕМУ при ковзаннях від 1 до -0,5:
а - 4АМУ100L4, б - 4АМУ225М4, в - 4АМУ355М4;

----- кутова швидкість ротора;
— електромагнітний момент;
..... струм фази статора

За представленими осцилограмами можна зробити такі висновки. Найбільш сприятливі умови для підключення до мережі існують на робочій ділянці механічної характеристики від ковзання, близького до нуля до критичного. У цьому діапазоні у всіх двигунів формується коливальний загасаючий момент з амплітудою від $2M_n$ до $3M_n$. Час згасання електромагнітного моменту більше у двигунів більшої потужності. Амплітуди струму сягають 4-6 від амплітуди номінального струму. У всіх інших випадках формуються моменти та струми більшого значення, що сягають пускових значень при $s = 1$.

3.2. Підключення двигуна до мережі з нульовими ПЕМУ

Перемикання двигуна на мережу відбувається після завершення пуску і досягнення режиму, що встановився, з заданим моментом навантаження. Перед відключенням фіксуються кінцеві значення вектору потокозчеплення ротора і швидкості і вектору напруги мережі i . У всіх випадках режиму вектор потокозчеплення відстає від вектору напруги приблизно на 90 ел. град, а ЕРС статора на 180 ел. град. Уточнення просторового розташування вектору потокозчеплення, у разі, немає вирішального значення [13].

3.3. Перехідний процес вибігу АД

Зважаючи на те, що в електричному ланцюзі з активно-індуктивним навантаженням струм не можна змінити стрибком, накопичена в навантаженні електромагнітна енергія не може бути виведена миттєво, і спроби розриву ланцюга викликають перенапруги в місці розриву, які можуть виявитися небезпечними для обладнання [14]. Які особливості комутації таких ланцюгів? Контактної комутації сприяє електрична дуга, що виникає при розмиканні контакту, завдяки чому струм спадає не миттєво і перенапруження обмежені. При безконтактної комутації, коли ланцюг розривається досить швидко, застосовуються спеціальні схемотехнічні рішення у вигляді зворотних діодів, зворотних мостів і ємнісних накопичувачів енергії. Близьким до ідеального елемента, що комутує, є тиристор, що працює в режимі природної комутації. При зменшенні струму в ланцюзі до нуля він закривається, в принципі не викликаючи перенапруг в ланцюзі, що комутує.

Режим вибігу настає після відключення двигуна від мережі і є уповільненням двигуна під дією моменту навантаження і моменту механічних втрат. В АД у режимі вибігу, крім механічного процесу уповільнення, протікає електромаг-

нітний процес згасання магнітного потоку ротора. Магнітний потік ротора, що обертається, наводить в обмотках статора ЕРС. Сума миттєвих значень ЕРС і напруги мережі впливає на розімкнені контакти лінійного контактора або напівпровідникові прилади, які комутують, як показано для однієї з фаз на рис. 2.

Напруга мережі u_1 має стабільну частоту ω_0 , а ЕРС статора e_1 частоту обертання ротора ω . Складна форма сумарної напруги u_k , яку можна виміряти на розімкнутому контакті, причому вектори напруги мережі та ЕРС статора в процесі вибігу можуть багаторазово збігатися у напрямку або знаходитися в протифазі. У першому випадку до контакту прикладається максимальна напруга, а в другому - мінімальна.

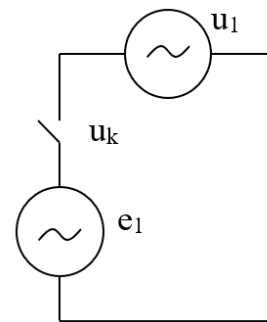


Рис. 2. Спрощена схема АД у режимі вибігу після відключення від мережі

Для контактної апарату ці напруги, можливо, не мають великого значення. Для напівпровідникових безконтактних приладів - тиристорів, транзисторів, величина максимальної напруги в закритому стані може виявитися критичною. Асинхронний двигун є багатофазним, багатоконтурним активно-індуктивним навантаженням. Електромагнітна енергія зосереджена в головному магнітному ланцюзі - контурі намагнічування, і в ланцюгах розсіювання магнітного потоку в статорі, і в роторі. При відключенні обмотки статора, коли її струм стає рівним нулю, зводиться до нуля лише енергія потоків розсіювання обмотування статора [9]. Решта електромагнітної енергії в момент комутації залишається незмінною і підтримується за рахунок струмів короткозамкненої обмотки ротора. Це означає, що комутується незначна частина повної електромагнітної енергії АД, зосереджена тільки в полях розсіювання статора обмотки. Саме цю енергію треба враховувати під час розрахунку спеціальних ємнісних фільтрів. Ця обставина так само дозволяє погоджувати між собою кінцеві електромагнітні умови перед відключенням і початкові електромагнітні умови режиму вибігу АД. Змінні рівняння потокозчеплення ротора для узагальне-

ної електричної машини, що описується в осях α , β , в момент відключення

$$\left. \begin{aligned} \psi_{2\alpha \text{ кін}} &= i_{2\alpha \text{ кін}} \cdot \frac{x_r}{\omega_0} + i_{1\alpha \text{ кін}} \cdot \frac{x_0}{\omega_0}, \\ \psi_{2\beta \text{ кін}} &= i_{2\beta \text{ кін}} \cdot \frac{x_r}{\omega_0} + i_{1\beta \text{ кін}} \cdot \frac{x_0}{\omega_0}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де x_r, x_0 - індуктивні опори ланцюга ротора та контуру намагнічування, Ом.

Приймаючи незмінним значення вектору потокозчеплення ротора в момент комутації, нове значення струму ротора, що є початковим для режиму вибігу при струмі статора, що дорівнює нулю

$$\left. \begin{aligned} i_{2\alpha \text{ поч}} &= \psi_{2\alpha \text{ кін}} \cdot \frac{\omega_0}{x_r}, \\ i_{2\beta \text{ поч}} &= \psi_{2\beta \text{ кін}} \cdot \frac{\omega_0}{x_r}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

а рівняння електричної рівноваги контурів статора та ротора матимуть вигляд

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} + u_{k\alpha}, \\ u_{1\beta} &= \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} + u_{k\beta}, \\ 0 &= i_{2\alpha} r_2 + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega \psi_{2\beta}, \\ 0 &= i_{2\beta} r_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - \omega \psi_{2\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Рівняння потокозчеплень статора та ротора

$$\left. \begin{aligned} \psi_{1\alpha} &= i_{2\alpha} \frac{x_0}{\omega_0}, \quad \psi_{1\beta} = i_{2\beta} \frac{x_0}{\omega_0}; \\ \psi_{2\alpha} &= i_{2\alpha} \frac{x_r}{\omega_0}, \quad \psi_{2\beta} = i_{2\beta} \frac{x_r}{\omega_0}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рівняння механічної рівноваги

$$0 - M_C = J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}. \quad (5)$$

Напруга на контакті знаходиться з рівняння електричної рівноваги контуру статора (3) за відомими миттєвими значеннями напруги живлення та ЕРС, що наводиться в статорі обмотці магнітним потоком ротора. Процес вибігу досліджувався відповідно до (3) - (5). Початкові електромагнітні умови процесу вибігу залежать від умов попереднього режиму, що встановився, а вони, у свою чергу, залежать від параметрів АД і навантаження на валу. Тому попередньо досліджувався процес пуску, а при настанні режиму фіксувалися значення потокозчеплення і швидкості ротора АД. Ці значення як початкові задавалися в інтеграторах моделі.

На початку перехідного процесу вектори напруги мережі та ЕРС статора практично знахо-

дяться у протифазі, тому початкова напруга на вентилі невелика (рис. 3). На осцилограмі напруги u_k ця ділянка називається вузлом. Далі вектори починають розходитися і напруга на контакті зростає, досягаючи максимуму, коли вектори починають збігатися. Ця ділянка називається пучністю. Слід зауважити, що на осцилограмах наведено проєкції векторів напруги та ЕРС тільки на вісь α , тому за їх миттєвими значеннями візуально важко судити про збіг або розходження векторів.

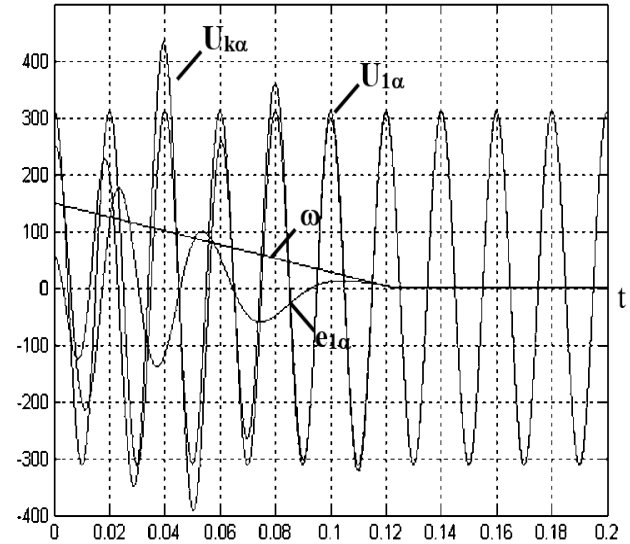


Рис. 3. Осцилограми режиму вибігу АД 4АМУ100L4, $J_\Sigma = 2 \text{ Дж}$, $M_c = M_n$

Наведена осцилограма знята для АД, навантаженого номінальним моментом. На вибігу відбувається інтенсивне гальмування з допомогою навантаження, і ЕРС статора також інтенсивно зменшується, переважно за рахунок зменшення швидкості.

У момент настання пучності максимальна напруга u_k становить 435 В. Наприкінці вибігу ЕРС статора дорівнює нулю, а напруга на контакті дорівнює напруги мережі. Значна кількість вузлів і пучностей має місце у разі вибігу в режимі холостого ходу, коли початкове потокозчеплення і швидкість ротора більше, а зменшення швидкості відбувається повільніше (рис. 4). У цьому прикладі ЕРС статора зменшується в основному за рахунок загасання потоку ротора, а не зменшення швидкості. Максимальна напруга на контакті тут не більша, ніж у попередньому випадку, оскільки момент пучності настає пізніше і до цього часу потік ротора значно згасає. На практиці таке поєднання початкових умов можливе, коли напруга на контакті буде максималь-

ною. Ці умови легше наступають для АД високої потужності, у яких завдяки більшій механічній та електромагнітній інерційності згасання та потоку, та швидкості відбувається набагато повільніше (рис. 5). Тут напруга на контакті досягає вже 525 В.

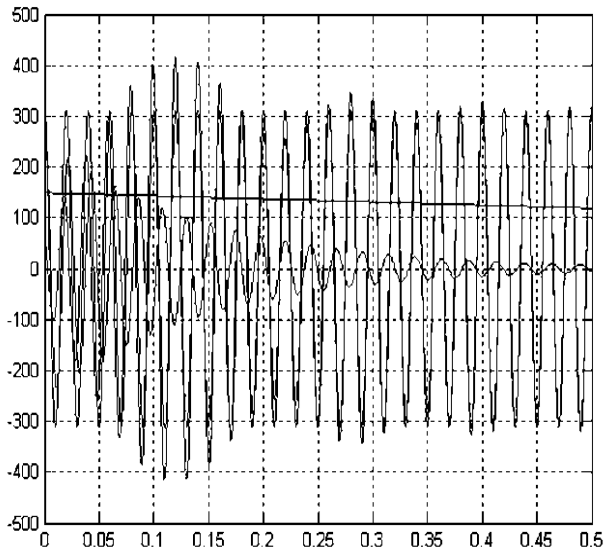


Рис. 4. Осцилограми режиму вибігу 4AMU100L4, $J\Sigma = 2\text{Jдв}$, $Mс = 0,05\text{Mн}$

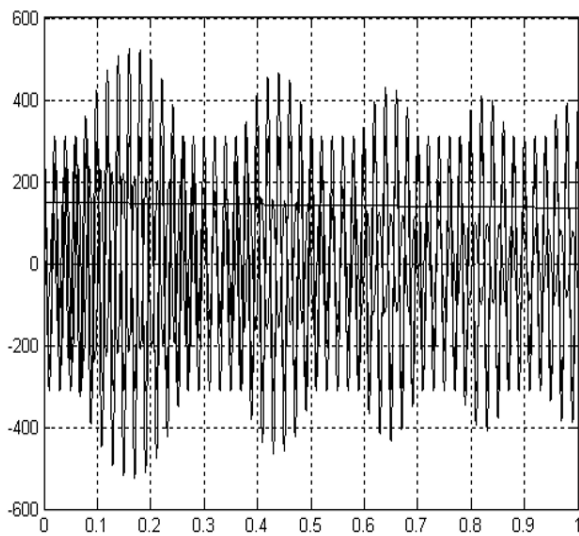


Рис. 5. Осцилограми режиму вибігу 4AMU225M4, $J\Sigma = 2\text{Jдв}$, $Mс = 0,05\text{Mн}$

Схожа картина може спостерігатися при відключенні від мережі частотно-регульованого електроприводу зі ланкою постійного струму та інвертором напруги. У разі, якщо відключення від мережі та закриття вентилів інвертора відбуваються одночасно, то до них прикладається сума лінійної випрямленої напруги фільтра U_{cf} і

загасаючої ЕРС статора. Слід зазначити, що математичний опис виконується щодо фазних величин АД [16]. Це справедливо при одночасному відключенні всіх трьох фаз та симетричному навантаженні. Можливі випадки неодночасного відключення фаз або, наприклад, випадок аварійного відключення АД при пробі одного з вентилів у фазі [1]. У таких умовах до розімкнутого контакту або закритого вентиля в інших фазах прикладається сума лінійних величин напруги мережі та ЕРС. При несприятливому поєднанні параметрів ця напруга в межі може досягати подвійної амплітуди лінійної напруги мережі.

4. Сприятливі та несприятливі умови підключення АД до мережі

У разі збігу результуючих трифазних векторів напруги мережі та ЕРС статора процес підключення буде проходити найбільш жорстко під дією суми напруги електричної мережі та ЕРС, з великими струмами, піками моменту та коливаннями швидкості. І навпаки, підключення АД до мережі в момент часу, коли вектори напруги мережі та ЕРС перебувають у протифазі, викличе м'якший перехідний процес. У цьому сенсі умови включення можна характеризувати як несприятливими чи сприятливими. Відповідно до картини напруги на контакті під час вибігу сприятливі умови включення відповідають вузлам, а несприятливі умови пучностям кривої напруги на контакті [17]. Ілюстрація перехідних процесів при сприятливих та несприятливих ПЕМУ наведена на рис. 3. Тут, на тлі графіка напруги на контакті, наводяться перехідні процеси, що відрізняються витримкою часу між відключенням і повторним включенням. Кожне з включень збігається з пучністю або з вузлом напруги на контакті. При підключенні момент пучності спостерігаємо десятикратні імпульси струму і десятикратні негативні імпульси моменту. При підключенні на момент настання вузла негативні імпульси моменту відсутні, амплітуди струму набагато менше.

5. Управління процесом повторного увімкнення з урахуванням можливостей контактної апаратури

Оцінку можливостей управління можна виконати, зіставляючи між собою тимчасові інтервали після відключення АД: постійну часу загасання ЕРС статора.

$$T_m = \frac{J_{\Sigma} \omega_0}{M_c} . \quad (6)$$

Механічна стала дорівнює часу гальмування електроприводу від синхронної швидкості до нуля під дією постійного моменту навантаження [8]. У таблиці 1 наведено зазначені величини для трьох аналізованих двигунів і двох характерних режимів - легкого (холостий хід з $M_c = 0,1M_n$) і важкого (робота під навантаженням з $M_c = M_n$). В усіх випадках враховується інерційність електроприводу $J_{\Sigma} = 1,1J_{\text{де}}$.

Аналіз результатів табл. 1 показує, що з використання перетворювача частоти для послідо-

вного пуску декількох АД необхідно враховувати, що:

- двигун можна розганяти до швидкості вище синхронної і, тим самим, компенсувати падіння швидкості за час настання сприятливих умов;

- проблема визначення сприятливих умов включення складніша. Після відключення двигуна від ПЧ на контакті апарата, що підключає до мережі, спостерігається та ж картина напруги, проте не синхронізована з моментом відключення, як це має місце при пуску від ТПН. У разі наступ вузлів напруги треба контролювати не розрахунковим, а апаратним способом.

Таблиця 1

Визначені величини динамічних режимів асинхронних двигунів

Двигун	Режим роботи	Постійні часу		Час настання вузлів напруги		Час спрацьовування контакторів	
		$T_e, \text{с}$	$T_m, \text{с}$	$T_{кз1}, \text{с}$	$T_{кз2}, \text{с}$	$T_{\text{вим}}, \text{с}$	$T_{\text{вимк}}, \text{с}$
4АМУ100L4, 4 кВт	$M_c=0,1M_n$	0,152	0,712	0,18	0,259	0,015	0,02
	$M_c=M_n$		0,0712	0,055	0,08		
4АМУ225M4, 55 кВт	$M_c=0,1M_n$	0,92	3,12	0,384	0,545	0,012	0,03
	$M_c=M_n$		0,312	0,118	0,169		
4АМУ355M4, 315 кВт	$M_c=0,1M_n$	1,33	5,97	0,532	0,754	0,07	0,07
	$M_c=M_n$		0,597	0,164	0,235		

Висновки

Аналіз напруги на комутуючих елементах при вибігу асинхронних двигунів різного типова виконання показав, що умови виникнення максимумів напруги на контакті частіше наступають для двигунів великої потужності з малим навантаженням на валу.

У всіх розглянутих випадках час появи вузла напруги на контакті більше часу спрацьовування контакторів, отже введенням додаткової витримки часу можна реалізувати сприятливі умови повторного включення.

Початкові умови більш сприятливі в режимі холостого ходу асинхронного двигуна, коли швидкість і ЕРС статора не встигають значно згаснути до моменту настання вузла.

При роботі електроприводу під навантаженням також можлива формальна реалізація сприятливих умов включення, проте при цьому за час появи першого вузла напруги на контакті, швидкість двигуна значно зменшується (двигун 4АМУ100L4 зменшує швидкість до $0,23\omega_0$, а двигун 4АМУ225M4 до $0,62\omega_0$) пусковий процес починається наново.

При експериментальному налагодженні режиму перемикачів слід поєднувати появу струму статора в момент включення з вузлом напруги на контакті.

Список використаної літератури

- Gumilar, L., Afandi, A., N., Sujito; Faiz, M., R. (2021). Starting Induction Motor at Different Voltage Levels in the Electrical Power System. 2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT), 3251-3266. doi: 10.1109/IEIT53149.2021.9587354
- Xuesong, Z., Youjie, M., Zhiqiang G., Shaowei, Z. (2017). Reactive power compensation in motor. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1134-1151. doi: 10.1109/ICMA.2017.8015831
- Langlang, G., Dezetty, M., Mokhammad, S., Stieven, N., R. (2020). Transient in Electrical Power System under Large Induction Motor Starting Condition. 2020 2nd International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS), 1-5. doi: 10.1109/ICORIS50180.2020.9320791
- Malyar, V., Hamola, O., Maday, V., Vasylychshyn, I. (2019) Static Characteristics of Asynchronous Motors with Series Reactive Power Compensation. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 141-144. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780064
- Wang, D., Zhao, J. (2020). Self-excitation Control of Squirrel-Cage Induction Motor based on

- Super-Twisting Sliding Mode Algorithm. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 500-504. doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194868
6. Michaelides, A., Nicolaou, T. (2017). Starting and running the induction motor with a variable capacitor. 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), 87-90. doi: 10.1109/EMES.2017.7980388
7. Guha, A., Narayanan, G. (2018). Impact of Undercompensation and Overcompensation of Dead-Time Effect on Small-Signal Stability of Induction Motor Drive. IEEE Transactions on Industry Applications, 1-1. doi: 10.1109/TIA.2018.2846719
8. Yin, S., Xia, J., Zhao, Z. (2020). Fast Restarting of Free-Running Induction Motors Under Speed-Sensorless Vector Control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, 6124 – 6134. doi: 10.1109/TIE.2019.2934077
9. Wang, S., Lee, F., C., Wyk, J., D. (2016). Inductor winding capacitance cancellation using mutual capacitance concept for noise reduction application. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 48(2), 311-318. doi: 10.1109/TEMC.2006.873867
10. Ejiogu, E., C., Tanno, Y. (1993). Capacitor self-excitation braking of the induction motor. Proceedings of IECON Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, vol. 2, 891-895. doi: 10.1109/IECON.1993.339157
11. Boiko, A., A., Besarab, A., N., Sokolov, Y., A., Shapa, L., N. (2019). Improvement of Energy Indicators of Asynchronous Motor under the Conditions of Asymmetric Voltage Supply. Problemele Energeticii Regionale, no. 1–1 (40), 25–35. doi: 10.5281/zenodo.3239133
12. Lekhchine, S., Bahi, T., Laouar, I., Leulmi, R. (2023). Control and Optimization for a Photovoltaic Pumping System Using Induction Motor Vector Control. 14th International Renewable Energy Congress, 307-324. doi: 10.1109/IREC59750.2023.10389517
13. Andryushchko, O., A., Boiko, A., A. Analiz protsesov otklyucheniya ot seti I vybega asinkhronogo dvigatelya [Analysis of the processes of disconnection from the mains and coasting of an asynchronous motor]. – Elektromashinostroenie I elektrooborudovanie – Electrical engineering and electrical equipment, 2012, no. 69, pp. 28-31. (In Russian).
14. Sunal, C., E., Dyo, V., Velisavljevic, V. (2022). Review of Machine Learning Based Fault Detection for Centrifugal Pump Induction Motors. IEEE Access, vol. 10, 71344 – 71355. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3187718
15. Rao, Y., R. Current Based Restarting Method for Rotating Sensorless Induction Motor Drive. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 38, 2239– 2242. doi: 10.1109/TEC.2023.3289065
16. Boiko, A., Naidenko, E., Besarab, A., Maevskaya, E. (2024). Study of Starting and Disconnecting Modes of an Asynchronous Electric Drive of a Centrifugal Pump. E-Journal «Problemele energeticii regionale», № 2 (62), 28 — 37. doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.03
17. Lee, K., Lukic, S., Sara, A. (2016). A universal restart strategy for induction machines. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 1344 – 1359. doi: 10.1109/ECCE.2016.7854802

References

- Gumilar, L., Afandi, A., N., Sujito; Faiz, M., R. (2021). Starting Induction Motor at Different Voltage Levels in the Electrical Power System. 2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT), 3251-3266. doi: 10.1109/IEIT53149.2021.9587354
- Xuesong, Z., Youjie, M., Zhiqiang G., Shaowei, Z. (2017). Reactive power compensation in motor. 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1134-1151. doi: 10.1109/ICMA.2017.8015831
- Langlang, G., Dezetty, M., Mokhammad, S., Stieven, N., R. (2020). Transient in Electrical Power System under Large Induction Motor Starting Condition. 2020 2nd International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS), 1-5. doi: 10.1109/ICORIS50180.2020.9]320791
- Malyar, V., Hamola, O., Maday, V., Vasylychshyn, I. (2019) Static Characteristics of Asynchronous Motors with Series Reactive Power Compensation. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 141-144. doi: 10.1109/ACITT.2019.8780064
- Wang, D., Zhao, J. (2020). Self-excitation Control of Squirrel-Cage Induction Motor based on Super-Twisting Sliding Mode Algorithm. 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIS), 500-504. doi: 10.1109/ICAIS49377.2020.9194868
- Michaelides, A., Nicolaou, T. (2017). Starting and running the induction motor with a variable capacitor. 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), 87-90. doi: 10.1109/EMES.2017.7980388

7. Guha, A., Narayanan, G. (2018). Impact of Undercompensation and Overcompensation of Dead-Time Effect on Small-Signal Stability of Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1-1. doi: 10.1109/TIA.2018.2846719
8. Yin, S., Xia, J., Zhao, Z. (2020). Fast Restarting of Free-Running Induction Motors Under Speed-Sensorless Vector Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, 6124 – 6134. doi: 10.1109/TIE.2019.2934077
9. Wang, S., Lee, F., C., Wyk, J., D. (2016). Inductor winding capacitance cancellation using mutual capacitance concept for noise reduction application. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(2), 311-318. doi: 10.1109/TEMC.2006.873867
10. Ejiogu, E., C., Tanno, Y. (1993). Capacitor self-excitation braking of the induction motor. *Proceedings of IECON Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, vol. 2, 891-895. doi: 10.1109/IECON.1993.339157
11. Boiko, A., A., Besarab, A., N., Sokolov, Y., A., Shapa, L., N. (2019). Improvement of Energy Indicators of Asynchronous Motor under the Conditions of Asymmetric Voltage Supply. *Problemele Energeticii Regionale*, no. 1–1 (40), 25–35. doi: 10.5281/zenodo.3239133
12. Lekhchine, S., Bahi, T., Laouar, I., Leulmi, R. (2023). Control and Optimization for a Photovoltaic Pumping System Using Induction Motor Vector Control. *14th International Renewable Energy Congress*, 307-324. doi: 10.1109/IREC59750.2023.10389517
13. Andryushchko, O., A., Boiko, A., A. Analiz protsesov otklyucheniya ot seti I vybega asinkhronogo dvigatelya [Analysis of the processes of disconnection from the mains and coasting of an asynchronous motor]. – *Elektromashinostroenie I elektrooborudovanie – Electrical engineering and electrical equipment*, 2012, no. 69, pp. 28-31. (In Russian).
14. Sunal, C., E., Dyo, V., Velisavljevic, V. (2022). Review of Machine Learning Based Fault Detection for Centrifugal Pump Induction Motors. *IEEE Access*, vol. 10, 71344 – 71355. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3187718
15. Rao, Y., R. Current Based Restarting Method for Rotating Sensorless Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, 2239– 2242. doi: 10.1109/TEC.2023.3289065
16. Boiko, A., Naidenko, E., Besarab, A., Maevskaya, E. (2024). Study of Starting and Disconnecting Modes of an Asynchronous Electric Drive of a Centrifugal Pump. *E-Journal «Problemele energeticii regionale»*, № 2 (62), 28 — 37. doi.org/10.52254/1857-0070.2024.2-62.03
17. Lee, K., Lukic, S., Sara, A. (2016). A universal restart strategy for induction machines. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1344 – 1359. doi: 10.1109/ECCE.2016.7854802

Features of Formation of Dynamic Modes of Asynchronous Motors when Started from One Device

A. O. Boyko, O. V. Naidenko, A. A. Saveliev, S. M. Zabrodsky
Odessa National Polytechnic University

Abstract. The article solves the problem of forming dynamic modes of induction motors during starting from a single starting device. A mathematical description of the processes of disconnection from the power supply network and coasting of induction motors is performed. An analysis of the shape and magnitude of the voltage on the switching elements during coasting is carried out. An assessment of the influence of motor power on the transient processes of connection to the power supply network is given. Recommendations are given for ensuring favorable conditions for connecting induction motors to the power supply network, taking into account the capabilities of semiconductor starting devices and the use of contact equipment.

Keywords: dynamic modes, asynchronous motor, network connection, starting conditions, motor coasting, transient processes, initial electromagnetic conditions.

Отримано 28.02.2025



Бойко Андрій Олександрович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua; тел. +38 048 705 8581

Boiko Andrii, Dr. of Science, professor of Department of Electricity and Energy Management, Odessa National Polytechnic University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: a.o.boyko@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 8581

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0048-9259>



Найденко Олена Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E - mail: avnaidenko@op.edu.ua; тел. +38 048 705 73 88

Naidenko Olena, PhD technical, associate professor, associate professor of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine. E-mail: avnaidenko@op.edu.ua, ph.: +38 048 705 85 48

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5684-5617>



Савельєв Артем Андрійович, PHD, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E - mail: savieliev.a.a@op.edu.ua, тел. +38 048 705 85 48

Savieliev Artem, PhD, senior lecturer of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: savieliev.a.a@op.edu.ua; ph.: +38 048 705 85 48

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6949-5959>



Заброцький Сергій Миколайович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; проспект Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E - mail: zabroczkijoo@gmail.com, т. +38 048 705 85 48

Zabroczkij Serhiy, postgraduate student of Department of Electricity and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Avenue, Odessa, 65044, Ukraine.
E-mail: zabroczkijoo@op.edu.ua, т. +38 048 705 85 48

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7899-7150>