

УДК 621.313.333

[https://doi.org/ 10.35546/kntu2078-4481.2019.3.4](https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2019.3.4)

А.О. ЖЕЖЕЛО

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

ORCID: 0000-0003-4969-4659

О.Ю. КИМСТАЧ

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

ORCID: 0000-0002-1447-8852

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ ПІДВИЩЕНОЇ БЕЗВІДМОВНОСТІ

У роботі виконано формування переліку перехідних процесів в асинхронних двигунах підвищеної безвідмовності. Двигуни цього типу мають більшу кількість динамічних режимів, які ще не були детально досліджені раніше, але при цьому мають велике значення для роботи машини. Більша кількість динамічних режимів пов'язана з особливістю конструктивного виконання обмотки статора двигуна даного типу а також з його функціональними можливостями. Виконано аналіз попередніх досліджень, якій показав, що завдання моделювання перехідних процесів АД вирішувалося різними дослідниками окремо, тому не існує загального комплексного підходу, щодо формування універсальної моделі АД, яка придатна для всіх динамічних режимів. Відповідно для вирішення означеної проблеми спочатку необхідно визначити коло всіх типів перехідних процесів. Мета роботи – формування переліку важливих перехідних процесів асинхронних двигунів підвищеної безвідмовності для подальших їх досліджень. У роботі були розглянуті перехідні процеси в аварійних режимах, таких як: коротке замикання на землю, міжвиткове та міжсекційне коротке замикання, обрив дроту. Серед цих режимів були виявлені найнебезпечніші та більш поширені, а саме: міжвиткове коротке замкнення та обрив фази. На ці режими слід звернути особливу увагу. Також визначені перехідні процеси у нормальних режимах, таких як: пуск з відключеними секціями обмотки, робота з відключеними секціями обмотки, режим регулювання. Ці перехідні процеси в нормальних режимах мають важливе значення при складанні математичної моделі для асинхронних двигунів підвищеної безвідмовності, а також для розуміння особливостей та небезпечні фактори, які необхідно враховувати при створенні математичних моделей а також експлуатації АД. Для окремих режимів побудовані заступні схеми, які дозволяють визначити основні співвідношення та алгоритми врахування у математичних моделях специфіки цих режимів.

Отримані результати досліджень систематизовані і представлені схематично у вигляді відповідної схеми.

Ключові слова: перехідні процеси, підвищена безвідмовність, асинхронний двигун, аварійні режими, нормальні режими, ідентифікація.

А.О. ЖЕЖЕЛО

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова

ORCID: 0000-0003-4969-4659

О.Ю. КИМСТАЧ

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова

ORCID: 0000-0002-1447-8852

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ПОВЫШЕННОЙ БЕЗОТКАЗНОСТИ

В работе выполнено формирование перечня переходных процессов в асинхронных двигателях повышенной безотказности. Двигатели этого типа имеют большее количество динамических режимов, которые еще не были детально исследованы ранее, но при этом имеет большое значение для работы машины. Большее количество динамических режимов связано с особенностью конструктивного исполнения обмотки статора двигателя данного типа а также с его функциональными возможностями. Выполнен анализ предыдущих исследований, которой показал, что задача моделирования переходных процессов АД решалась разными исследователями отдельно, поэтому не существует общего комплексного подхода, по формированию универсальной модели АД, которая пригодна для всех динамических режимов, в том числе несимметричных режимов. Соответственно для решения этой проблемы сначала необходимо определить круг всех типов переходных процессов. Цель работы - формирование перечня важных переходных процессов асинхронных двигателей повышенной безотказности для дальнейших их исследований. В работе были рассмотрены переходные процессы в аварийных режимах, таких как: короткое замыкание на землю, межвитковое и межсекционное

коротке замикання, обрив провада. Среди этих режимов были обнаружены опасные и наиболее распространенные, а именно: межвитковое короткое замыкание и обрыв фазы. На эти режимы следует обратить особое внимание. Также определены переходные процессы в нормальных режимах, таких как: пуск с отключенными секциями обмотки, работа с отключенными секциями обмотки, режим регулирования. Эти переходные процессы в нормальных режимах имеют важное значение при составлении математической модели для асинхронных двигателей повышенной безотказности, а также для понимания функциональных возможностей машины данного типа. Для большинства динамических режимов определены их особенности и опасные факторы, которые необходимо учитывать при создании математических моделей а также эксплуатации АД. Для отдельных режимов построены схемы замещения, которые позволяют определить основные соотношения и алгоритмы учета в математических моделях специфики этих режимов.

Полученные результаты исследований систематизированы и представлены схематически в виде соответствующей схемы.

Ключевые слова: переходные процессы, повышенная безотказность, асинхронный двигатель, аварийные режимы, нормальные режимы, идентификация.

A.O. ZHEZHELO

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID: 0000-0003-4969-4659

O.Yu. KIMSTACH

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID: 0000-0002-1447-8852

IDENTIFICATION OF TRANSITION PROCESSES IN ASYNCHRONOUS MOTORS OF IMPROVED RELIABILITY

A list of transients in induction motors with increased reliability was completed. Electrical machines of this type have a greater number of dynamic modes, which have not yet been researched in detail earlier, but it is of great importance for the operation of the machine. A greater number of dynamic modes is associated with a feature of the design of the stator winding of this type of engine and also with its functionality. An analysis of previous researches was performed, which showed that the task of modelling transients in induction motors was solved by different researchers separately, so there is no general comprehensive approach to the formation of a universal model of induction motor that is suitable for all dynamic modes. Accordingly, to solve this problem, it is firstly necessary to determine the range of all types of transient processes. The purpose of the work is the formation of a list of important transients of induction motors with increased reliability for their further researches. The work considered transients in emergency modes, such as: short circuit to earth, turn-to-turn and intersectional short circuit, wire breakage. These modes should be given special attention. Among these modes, the most dangerous and most widespread were found, namely: turn-to-turn short circuit and phase failure. Transient processes in normal modes were also defined, such as: start with disconnected winding sections, operation with disconnected winding sections, control mode. These transients in normal conditions are important in compiling a mathematical model for asynchronous motors with increased reliability, as well as for understanding the functional capabilities of this type of machine. For the majority of dynamic modes, their features and hazards have been identified. For part of modes, equivalent schemes were constructed that allow defining the basic relations and algorithms of accounting for the specific features of these modes in mathematical models.

The obtained research results are systematized and presented schematically in the form of a corresponding scheme.

Keywords: transient processes, increased reliability, induction motor, emergency modes, normal modes, identification.

Постановка проблеми

Перехідні процеси в асинхронних двигунах (АД) характеризуються важкими явищами, які викликають тяжкі наслідки для обмотки, механічної частини двигуна. Так при пуску АД виникає великий пусковий струм, який негативно впливає на ізоляцію статорних обмоток, викликаючи її передчасне зношення, яке пов'язано з перегрівом обмоток і появою електродинамічних зусиль, що порушують цілісність обмотки особливо в лобових частинах. Великі кидки струму позначаються на надійності комутаційної апаратури, ускладнюють настройку захисту і, головне, призводять до короточасних, але значних, коливань напруги в мережі, що порушує нормальну роботу інших електроприймачів, які живляться від цієї мережі. Це особливо відчутно для автономних електроенергетичних систем обмеженої потужності.

Наведені фактори свідчать про важливість дослідження перехідних процесів, які пов'язані з

експлуатацією АД, але ще більше це стосується спеціальних АД. Так для асинхронного двигуна з підвищеною безвідмовністю (АДПБ) [1, 2] кількість варіантів динамічних режимів зростає у декілька разів, а деякі умови роботи, що для звичайних АД неприйнятні, можна розглядати як нормальні.

Тому для розуміння роботи АДПБ, потрібно ідентифікувати та проаналізувати найважливіші перехідні процеси, враховуючи особливості конструктивного виконання АДПБ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання дослідження динамічних режимів АД не нове, існує багато праць, в котрих розглядаються математичні моделі АД [3, 4, 5, 6], але всі вони стосуються у більшості звичайних АД, що працюють у нормальних умовах.

Останнім часом з'явилась низка робіт, в яких розглядається більш складні та удосконаленні моделі АД та нестандартні умови, це стало можливим у зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки та програмного забезпечення.

Так відомо про дослідження АД з покращеним показником живучості двигуна в аварійному режимі [7], але у цьому випадку розглядається лише такий аварійний режим як обрив фази, що не відображає повністю складність усіх можливих перехідних процесів.

У роботі [8] був досліджений метод оцінювання перехідних процесів в АД, а також розглянута задача граничного навантаження, але все це у загальних умовах без врахування аварійних режимів.

Автори роботи [9] досліджували вплив аварійних режимів на роботу АД, а також можливі причини цих аварій, але вони обмежилися лише переліком стандартних аварійних режимів.

У роботі [10] було досліджено вплив міжвіткових та міжфазних коротких замикань в асинхронному генераторі. Запропоновано спосіб діагностування міжвіткових к.з. за допомогою датчиків, але це коштвна система, яка спрямована на лише один аварійний режим – коротке замкнення.

У роботі [11] було проведено моделювання процесів АД після переходу з трьохфазного режиму роботи в однофазний, але це моделювання лише одного нормального режиму роботи.

В цілому, якщо проаналізувати результати попередніх досліджень, можна зробити висновок, що завдання моделювання перехідних процесів у АД вирішувалося різними дослідниками окремо, тому не існує загального комплексного підходу, щодо формування універсальної моделі АД, яка придатна для всіх динамічних режимів. Відповідно для вирішення означеної проблеми спочатку необхідно визначити коло всіх типів перехідних процесів.

Формулювання мети дослідження

Таким чином, формування переліку динамічних режимів з визначенням їх особливостей для врахування в узагальненій математичній моделі являється першим кроком у комплексному вирішенні зазначеної проблеми.

Мета роботи – формування переліку важливих перехідних процесів АДПБ для подальших їх досліджень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для розуміння роботи електричних машин, необхідно знати як і в яких умовах протікають перехідні процеси. Так само і для розуміння роботи АДПБ, потрібно проаналізувати перехідні процеси як в аварійних, так і в нормальних режимах.

Найбільший інтерес мають перехідні процеси в АДПБ в момент відключення пошкоджених ділянок обмотки, такі режими являються специфічними для даної машини.

До важливих нормальних режимів АДПБ відносяться пуск з відключеною секцією обмотки, відключення секції обмотки при роботі в режимі навантаження, а також режим регулювання частоти обертання або моменту.

Пуск АДПБ з відключеною секцією обмоток можливий, після аварійного режиму і необхідності включення двигуна повторно, або якщо була виключена деяка кількість витків обмотки при регулюванні. При цих режимах потрібно розглянути питання, за якої мінімальної кількості відключених секцій обмотки можливий повторний пуск.

При аналізі роботи АДПБ з відключенням секцій обмотки в режимі навантаження, потрібно визначити як буде змінюватися частота обертання та момент на валу. В статті це питання розглядалося в [2], але перехідні процеси при цьому ще не досліджувалися.

Також існує можливість регулювання швидкості обертання або моменту АДПБ за рахунок відключення частини секцій, тому такий режим слід враховувати при аналізі перехідних процесів.

Серед аварійних режимів найбільш небезпечним являються короткі замикання, які можна поділити на коротке замкнення на землю, міжсекційне та міжвіткове коротке замкнення.

Коротке замкнення на землю є небезпечним аварійним режимом, тому що при заземленні нульової точки виникають струми короткого замкнення, які можуть досягати значень двофазних або трьохфазних коротких замикань. На рис. 1 показано одну секцію обмотки АДПБ в якій відбулося коротке замкнення на землю в точці 1.

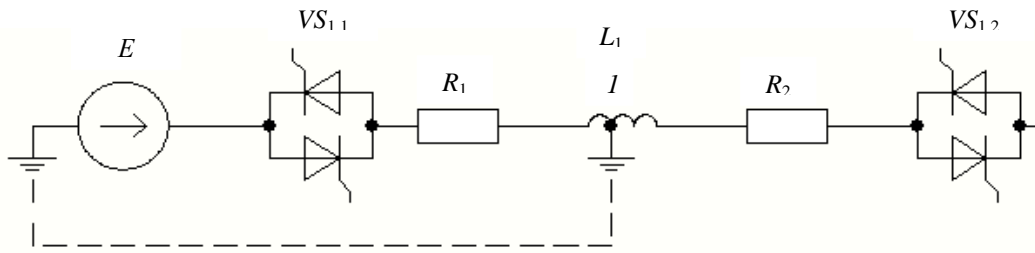


Рис. 1. Коротке замикання на землю в АДПБ

При короткому замиканні на землю на відрізку секції до точки короткого замикання з'являється $I_{кз}$ який додається до I_c , і сумарний струм на цьому відрізку стає більшим за струм на відрізку секції після точки короткого замикання (рис. 2.).

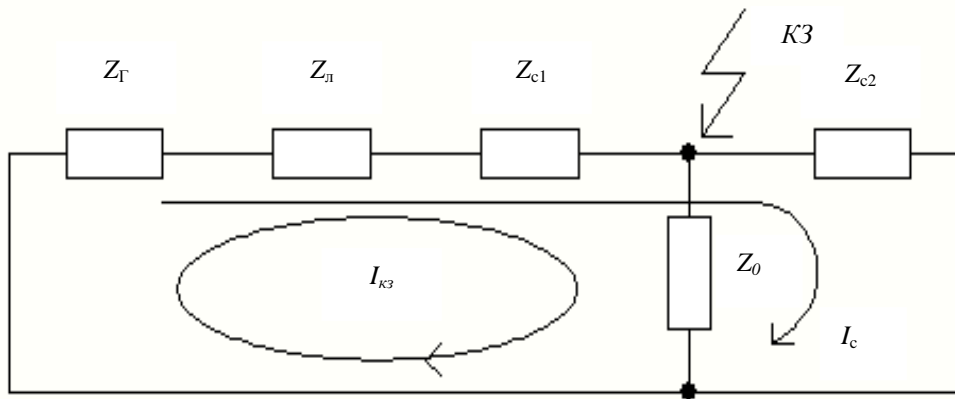


Рис. 2. Схема заміщення к.з. на землю

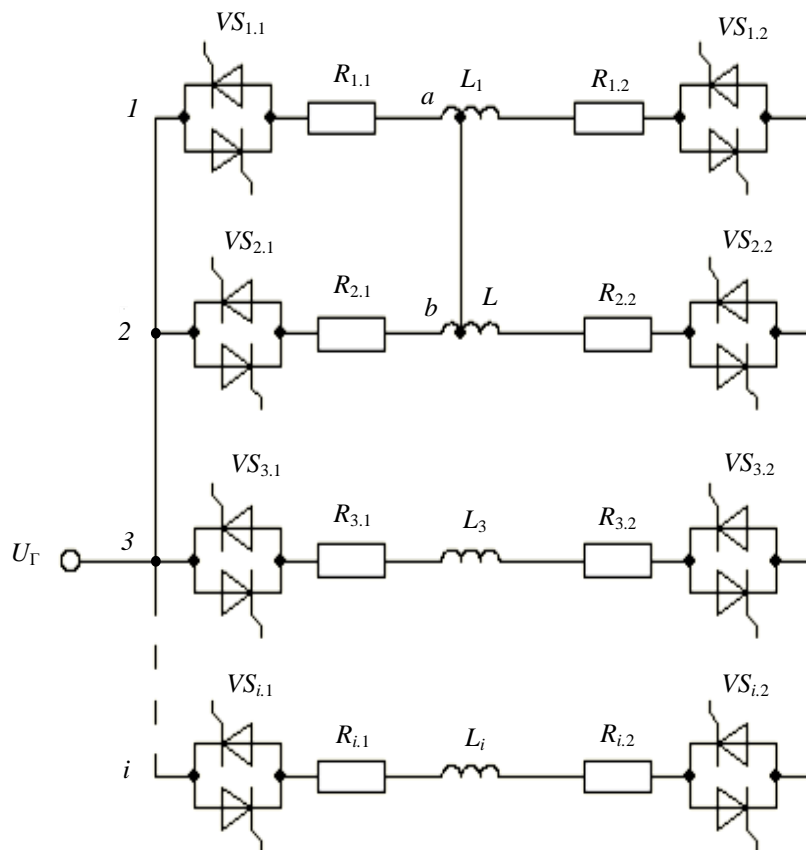


Рис. 3. Міжсекційне коротке замикання в АДПБ

Струм короткого замикання на землю розраховується за формулою:

$$I_{кз} = \frac{E}{Z_{\Gamma} + Z_c + Z_{л} + Z_0},$$

де E – ЕРС джерела живлення;
 Z_{Γ} – загальний опір джерела живлення;
 Z_c – загальний опір секції до точки к.з.;
 $Z_{л}$ – загальний опір лінії;
 Z_0 – загальний опір між точкою заземлення та джерела живлення.

На рис. 3 показана схема варіанту виконання обмотки АДПБ в якій відбулося міжсекційне коротке замикання.

Для розрахунку струму міжсекційного короткого замикання використовується схема заміщення (рис. 4.).

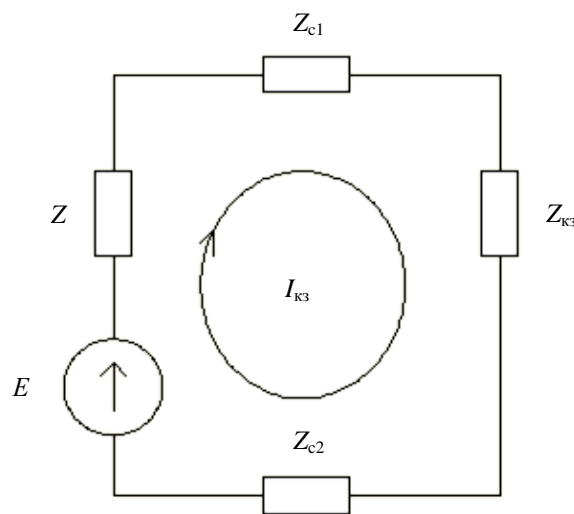


Рис. 4. Схема заміщення між секційного короткого замикання

Струм міжсекційного короткого замикання розраховується за формулою:

$$I_{скз} = \frac{E}{Z_{\Gamma} + Z_{c1} + Z_{c2} + Z_{кз}},$$

де Z_{c1} і Z_{c2} – загальні опори частин секцій в яких відбулось коротке замикання;
 $Z_{кз}$ – загальний опір короткого замикання (опір дуги).

У попередньому випадку (рис. 3) розглянуто виникнення міжсекційного короткого замикання в одній фазі, але існує можливість виникнення короткого замикання між секціями різних фаз (рис. 5). Такий режим більш небезпечний, тому що супроводжується ушкодженням одразу двох фаз, а коротке замкнення може підживлюватися напругою двох фаз або лінійною напругою, що відповідає більшій потужності, яка буде виділятися у точці короткого замкнення. Але порушити ізоляцію між секціями різних фаз досить складно, тому такі короткі замкнення відбуваються досить рідко.

Відповідно струм короткого замкнення при міжсекційному короткому замкнанні між фазами А і В розраховується за формулою:

$$I_{кзAB} = \frac{E_A - E_B}{Z_{\Gamma A} + Z_{\Gamma B} + Z_{cA} + Z_{cB} + Z_{кз}}.$$

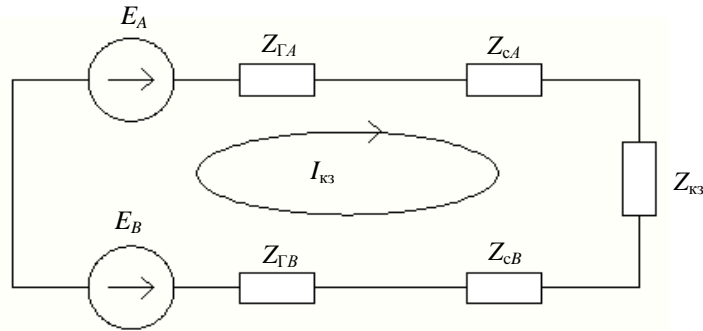


Рис. 5. Схема заміщення при міжсекційному короткому замиканні для різних фаз

Міжвиткове к.з. являється частою причиною виходу із строю АД. Воно становить більше 32 % [12] всіх поломок. Враховуючи, що всі пошкодження обмоток статора досягають 38 % [13], можна вважати міжвиткове коротке замикання основним типом аварії для статорної обмотки.

Основна причина в браку при виробництві при ручній укладці обмотки. Якщо вчасно не виявити міжвиткове к.з., двигун швидко виходить з ладу.

На рис. 6 показано схема варіанту виконання обмотки АДПБ в якій відбулося міжвиткове коротке замикання.

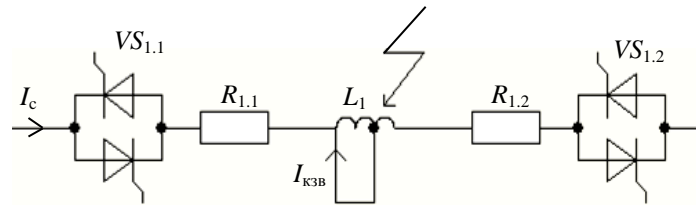


Рис. 6. Міжвиткове коротке замикання в АДПБ

При міжвитковому к.з., у витку наводиться ЕРС що впливає на струм у секції. При цьому навіть при відключенні секції, ця ЕРС залишиться, що може призвести до виникнення електричної дуги та подальшого ушкодження обмотки та магнітопроводу.

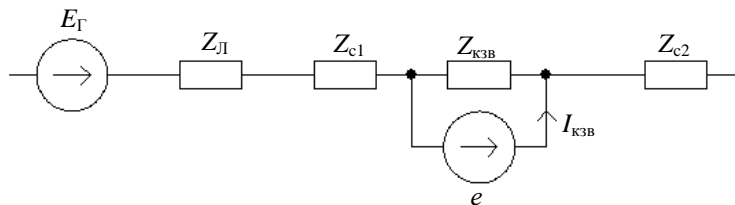


Рис. 7. Схема заміщення при міжвитковому короткому замиканні

Для визначення ЕРС короткозамкнених витків секції можна скористуватися відомою формулою:

$$e = 4,44 f w_{кзв} \Phi_c,$$

де f – частота напруги;
 $w_{кзв}$ – кількість витків
 Φ_c – магнітний потік у секції.

Магнітний потік, що перетинає короткозамкнені витки, дорівнює магнітному потоку у секції:

$$\Phi_c = B_{z \max} b_{z \min} l_{\delta} y_1,$$

де $B_{z \max}$ – максимальна магнітна індукція у зубці;
 $b_{z \min}$ – менша ширина зубця статора;
 l_{δ} – довжина магнітопроводу статора;

y_1 – шаг вітку у пазах.
Струм міжвиткового короткого замикання:

$$I_{\text{кзв}} = \frac{e}{Z_{\text{кзв}}},$$

де $Z_{\text{кзв}}$ – загальний опір короткозамкненого вітка, враховуючи опір електричної дуги.
Сумарний струм у частці секції з міжвитковим коротким замиканням:

$$\dot{I}_{\Sigma} = \dot{I}_{\text{кзв}} + \dot{I}_c.$$

Крім коротких замкнень, другим найбільш поширеним видом пошкоджень електричного характеру являється обрив живлення. Можливі варіанти обриву однієї чи декількох секцій, або обрив фази (рис. 8).

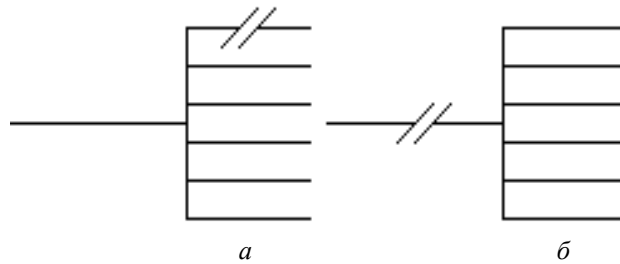


Рис. 8. Обриви секції (а) і фази (б)

Варіанти обриву фази:

1) Обрив стався до включення електродвигуна в мережу. Вал електродвигуна під час пуску в однофазному режимі не може повернутися навіть при відсутності навантаження. Це результат того, що на нього діють два магнітних поля, що утворюють два протилежних за знаком, але приблизно рівних за величиною моменти [2].

2) Обрив стався під час роботи електродвигуна. При цьому на його валу утворюється крутний момент, що визначається різними складовими. Тому, якщо фаза пропала під час роботи електродвигуна, коли його швидкість була близька до номінальної, обертовий момент у таких випадках буває достатнім для продовження роботи, але спостерігається зниження швидкості і ріст струму за умови збереження моменту навантаження [2].

Якщо обмотки електродвигуна були з'єднані за схемою «зірка», то після обриву фази дві послідовно з'єднані обмотки виявляються включеними на лінійну напругу U_{AB} (рис. 9).

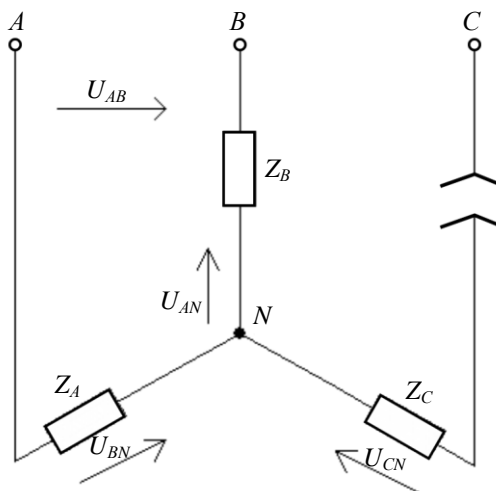


Рис. 9. З'єднання обмоток АД за схемою «зірка» після обриву фази

Так як опори Z_A і Z_B однакові і з'єднанні послідовно, напруги на фазах А і В складають:

$$U_{AN} = U_{BN} = U_{AB}/2$$

За умови збереження величини моменту на валу буде мати місце рівновага моментів у трифазному та однофазному режимах $M_3 = M_1$.

Момент АД у трифазному режимі:

$$M_3 = \frac{U_{AB}^2 p R'_2}{2\pi f s [(R_1 + c_1 R'_2/s)^2 + (X_1 + c_1 X'_2)^2]}$$

де R_1, R'_2, X_1, X'_2 та c_1 – параметри заступної схеми АД;

p – кількість пар полюсів АД;

s – ковзання.

Момент АД у однофазному режимі:

$$M_1 = M_{\text{пр}} - M_{\text{зв}} = \frac{2U_{AB}^2 p R'_2}{8\pi f s [(R_1 + c_1 R'_2/s)^2 + (X_1 + c_1 X'_2)^2]} - \frac{2U_{AB}^2 p R'_2}{8\pi f (2-s) [(R_1 + c_1 R'_2/(2-s))^2 + (X_1 + c_1 X'_2)^2]}$$

При роботі з частотою обертання, що відповідає навантаженню АД від холостого ходу до номінальної величини, зворотна складова моменту незначно впливає на вид механічної характеристики [2]. Тому для отримання співвідношень моментів у першому наближенні можна знехтувати $M_{\text{зв}}$, тоді:

$$M_1 \approx M_{\text{пр}} = \frac{U_{AB}^2 p R'_2}{4\pi f s [(R_1 + c_1 R'_2/s)^2 + (X_1 + c_1 X'_2)^2]}$$

Відповідно відношення моментів у трифазному та однофазному режимах:

$$\frac{M_3}{M_1} = \frac{U_{AB}^2 p R'_2}{2\pi f s [(R_1 + c_1 R'_2/s)^2 + (X_1 + c_1 X'_2)^2]} \cdot \frac{4\pi f s [(R_1 + c_1 R'_2/s)^2 + (X_1 + c_1 X'_2)^2]}{U_{AB}^2 p R'_2} = 2$$

Величина ковзання у трифазному та однофазному режимах також прийнята однаковою. З урахуванням, що електромагнітний момент АД:

$$M_3 = 3I_2'^2 \frac{R'_2}{s} \cdot \frac{p}{2\pi f},$$

а зведений струм у роторі I_2' можна вважати наближено еквівалентним струму статора I_1 , тоді:

$$M_3 \approx 3I_1^2 \frac{R'_2}{s} \cdot \frac{p}{2\pi f}$$

Відповідно співвідношення моментів:

$$\frac{M_3}{M_1} = 2 = \frac{3I_{13}^2}{I_{11}^2} \frac{R'_2 s}{2R'_2 s} \cdot \frac{p 2\pi f}{2\pi f p} = \frac{3I_{13}^2}{2I_{11}^2}$$

З останнього рівняння можна визначити співвідношення струмів:

$$\frac{I_{13}}{I_{11}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \approx 1,2$$

Тобто при зниженні моменту на валу у два рази при обриві однієї фази струм АД повинен підвищитися на 20 %, що небезпечно у тривалому режимі. Відповідно такий режим слід розглядати, як аварійний з одного боку, а з іншого – як можливий в обмеженому часі або при виконанні відповідних дій керування. Аналогічне співвідношення спостерігаються у пусковому режимі, але при цьому знехтувати зворотню складовою вже неможна, а пусковий момент наближується до нуля [2].

Всі вище розглянуті перехідні процеси узагальнені та систематизовані на рис. 10. При формуванні узагальної математичної моделі АДПБ всі їх слід врахувати, що можна виконати шляхом застосування заступних схем, які більш наочно демонструють сутність процесів та являються найбільш простим інструментом для застосування при аналізі роботи АД.

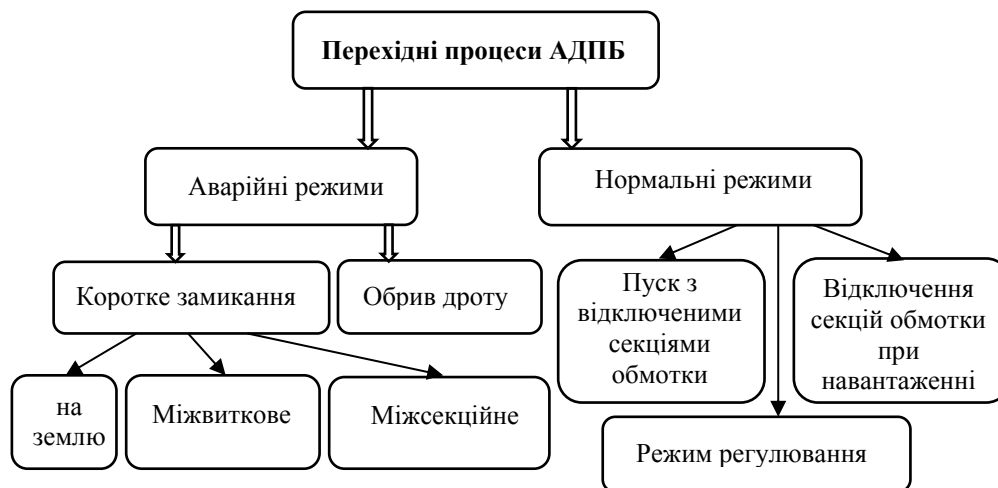


Рис. 10. Основні динамічні режими АДПБ

Наведена сукупність динамічних режимів відображає всі електричні явища, які викликають складні перехідні процеси. Звичайно існують перехідні процеси, які з'являються у наслідок механічних пошкоджень: заклинювання підшипників, радіальні та подовжні осьові зрушення внаслідок пошкодження підшипників або їх щитів, деформація вала та ін. Але такі пошкодження неможливо усунути шляхом керуючих дій системи управління АДПБ, тому вони не розглядаються.

Висновки

Проведена ідентифікація основних перехідних процесів в АДПБ, за якою були визначені такі перехідні процеси як: к.з. на землю, міжвиткове к.з., міжсекційне к.з., а також обрив дроту або відключення частки секції. Обрив дроту ділиться на обрив фази та обрив секції. Найчастішими аварійними режимами є міжвиткове к.з. та обрив фази, які слід дослідити більш детально.

Список використаної літератури

1. Жежело А.О., Кімстач О.Ю. Удосконалена схема підключення обмоток асинхронних двигунів підвищеної безвідмовності // Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених. – Миколаїв, 2018. – с. 72-73.
2. Кімстач О.Ю. Зависимость электромагнитного момента от количества отключенных секций обмотки статора асинхронного двигателя // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 2/2016 (34) – С. 87-93.
3. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: 2001. – с. 327.
4. Кулагін Д.О. Математична модель тягового асинхронного двигуна з урахуванням насичення // Техн. Електродинаміка. – Запоріжжя, 2014, № 6 – С. 49-55.
5. Загорский А.Е., Шакарян Ю.Г. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока. – М.: 1986. – 176 с.
6. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.: 1980. – 256 с.
7. Однокопылов И.Г., Дементьев Ю.Н. Обеспечение живучести асинхронных электроприводов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – Челябинск, 2014, Т.14, № 2. – С. 55-61.

8. Леонов Г.А., Зарецкий А.М., Соловьева Е.П. Метод оценивания переходных процессов асинхронных электрических машин // Вестник СПбГУ. – 2013, № 3. – С. 47-69.
9. Кондратюк О.Ю., Егоров А.Б. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты // Системи обробки інформації. – 2006, Вип. 4. – С. 79-86.
10. Богдан А.В., Соболев А.Н. Информационные признаки повреждения обмотки статора для построения релейной защиты автономного асинхронного генератора // Научный журнал КубГАУ, 2017, №131(07). – С. 1225-1236.
11. Ковалев Е.Б. Моделирование работы асинхронного электродвигателя в однофазном режиме // Государственное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования» – Донецк, 2013. – с. 141-151.
12. Wolkiewicz M., Skowron M. Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux // Power electronics and drives. 2017. – 2(37), No. 2, pp. 137-150.
13. Radecki A. Stator winding inter-turn short-circuit modelling of a squirrel-cage induction motor // Power electronics and drives. 2016. – Vol. 1(36), No. 1, pp. 139-148.

References

1. Zhezhelo A.O., Kimstach O.Yu. Reduced winding circuit of asynchronous motors of improved reliability. VseUkr. nauk-pract. konf. zdob. vish. osvitu i moloduh uchenuh [All-Ukr. Sci.-pract. Conf. applicants for higher education and young scientists]. Mykolayiv, 2018. – pp. 72-73.
2. Kimstach O.Yu. The dependence of the electromagnetic moment on the number of disconnected sections of the windings of a static asynchronous motor // Electromechanical and energy systems. - Kremenchuk: KrNU, 2016. - No. 2/2016 (34) – pp. 87-93.
3. Kopylov I.P. Mathematical modeling of electrical machines. - Moscow: 2001. 327 p.
4. Kulagin DO Mathematical model of traction asynchronous motor with regard to saturation // Techn. Electrodynamic. - Zaporizhzhia, 2014, No 6 - pp. 49-55.
5. Zagorsky A.E., Shakaryan Yu.G. Control of transients in AC machines. - Moscow: 1986. - 176 p.
6. Vazhnov A.I. Transients in AC Machines. - Moscow: 1980. - 256 p.
7. Odnokopylov I.G., Dementyev Yu.N. Providing survivability of asynchronous electric drives // Bulletin of the South Ural State University. - Chelyabinsk, 2014, Vol.14, No 2. - pp. 55-61.
8. Leonov G.A., Zaretsky A.M., Solovieva E.P. A method of estimating transient processes of asynchronous electric machines // Bulletin of SPbSU. - 2013, No. 3. - pp. 47-69.
9. Kondratyuk O.Yu., Egorov A.B. Analysis of emergency modes of operation of asynchronous motors to the question of choosing their effective protection // Processing Systems Information. - 2006, VIP. 4. - pp. 79-86.
10. Bogdan A.V., Sobol A.N. Information signs of stator winding damage for building relay protection of an autonomous asynchronous generator // Scientific journal KubSAU, 2017, No. 131 (07). - pp. 1225-1236.
11. Kovalev E.B. Modeling the operation of an asynchronous electric motor in single-phase mode // State institution "Research, Design and Technological Institute of Explosion-Proof and Mine Electrical Equipment" - Donetsk, 2013. - pp. 141-151.
12. Wolkiewicz M., Skowron M. Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux // Power electronics and drives. 2017. – 2(37), No. 2, pp. 137-150.
13. Radecki A. Stator winding inter-turn short-circuit modelling of a squirrel-cage induction motor // Power electronics and drives. 2016. – Vol. 1(36), No. 1, pp. 139-148.