

УДК 621.316

О. Ю. СТАДНІЙ, А. С. ВАСЮРА, Г. Д. ДОРОЩЕНКОВ

**АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ В РОБОТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ,
ЗАХОДИ ТА ЗАСОБИ ЇХ ЗАПОБІГАННЯ**

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: <alix.stadny@gmail.com>*

Анотація. В статті розглядаються аварійні ситуації в роботі асинхронних двигунів, проаналізовані чинники, що призводять до переходу двигунів в аварійний режим, розглянуті сучасні засоби запобігання таким ситуаціям.

Ключові слова: асинхронні двигуни, надійність електродвигунів, експлуатація двигунів, теплова модель двигуна, механічні та електричні аварії, аварійні режими роботи, згубні фактори впливу, пристрої захисту.

Анотация. В статье рассмотрены аварийные ситуации в работе асинхронных двигателей, проанализированы факторы, приводящие к аварийному режиму, рассмотрены современные средства предотвращения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, надежность электродвигателей, эксплуатация двигателей, тепловая модель Д, механические и электрические аварии, аварийные режимы работы, губительные факторы влияния, устройства защиты.

Abstract. In the article emergency situations are examined in-process asynchronous engines, analysed factors that result in passing of engines to malfunction, and also are modern facilities of prevention of such situations.

Keywords: asynchronous engines, reliability of electric motors, exploitation of engines, mechanical and electric accidents, malfunctions of work, ruinous factors of influence, devices of defence.

DOI: 10.31649/1681-7893-2019-37-1-109-115

ВСТУП

В багатьох галузях промисловості, в засобах систем управління та автоматики, в приладобудуванні, електропобутовій техніці тощо широкого застосування набули асинхронні двигуни (АД) - двигуни масового виготовлення та застосування. Причинами виняткового розповсюдження АД, насамперед, є простота будови, висока надійність та відносно мала собівартість виробництва. Вони виготовляються на номінальні потужності від частки вата до десятків тисяч кіловат. [1]

Асинхронні двигуни розраховані практично на 20 років служби без капітального ремонту, за умови оптимальної експлуатації відповідно до номінальних параметрів, які вказані в паспортних даних двигуна. Проте реальні умови експлуатації часто бувають далекими від нормативних, тобто такими, що не відповідають ДЕСТам.

Метою даної роботи є ознайомлення фахівців-початківців з реаліями експлуатації двигунів, чинниками, що здійснюють згубний вплив на АД, заходами і засобами запобігання можливих аварійних ситуацій та підвищення термінів експлуатації АД.

Під час експлуатації АД виникає чималий ряд факторів, які можуть призвести до аварійних ситуацій. Це, насамперед, низька якість напруги живлення та порушення правил технічної експлуатації: технологічні перевантаження, шкідливі умови навколишнього середовища (підвищена вологість, температура, агресивна атмосфера), зниження опору ізоляції, порушення умов охолодження тощо. В наслідок впливу таких чинників, а нерідко, і кількох одночасно, створюються аварійні режими роботи АД. [2,3]

За статистикою, в результаті аварій щорічно виходять з ладу до 10% парку електродвигунів. Наприклад, 60% свердловинних електронасосних агрегатів, виходять з ладу частіше ніж один раз на рік [4]. Поломка АД призводить до важких аварій та великого матеріального збитку, пов'язаного з простим технологічним процесом, усуненням наслідків аварій та ремонтом зламаного електродвигуна. До того ж, робота в аварійних режимах призводить до суттєвого підвищення електроспоживання з мережі живлення, збільшення споживаної реактивної потужності. Висока аварійність на виробництві призводить до значного зростання витрат підприємств в цілому.

Зважаючи на широку розповсюдженість та масовість використання АД, пріоритетними умовами експлуатації АД є запобігання критичних режимів роботи та створення комплексу заходів їх уникнення з метою попередження аварійних ситуацій. Обирати заходи і засоби запобігання аварійних

режимів слід з урахуванням специфіки процесів, які відбуваються в АД та є каталізаторами переходу до критичних ситуацій. Не в останню чергу, висуюються такі вимоги, як відносна дешевизна, простота та надійність.

Застосування ефективного захисту від аварійних ситуацій дозволяє суттєво знизити кількість і частоту аварій, значно продовжити термін експлуатації двигунів, знизити споживання електроенергії та експлуатаційні витрати.

Для обґрунтованого вибору відповідного ефективного захисту, слід з'ясувати, як і від якої причини необхідно захищати двигун, та які процеси відбуваються в ньому внаслідок виникнення аварійної ситуації. [4]

АНАЛІЗ ПОШИРЕНИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ В РОБОТІ АД

Найчастішими першопричинами руйнування АД є: коротке замикання обмоток, обрив фази, заклинювання підшипникових вузлів ротора чи виконавчого механізму, технологічні перенавантаження, погіршення охолодження, зниження опору ізоляції нижче допустимого рівня, асиметрія напруги живлення. Розглянемо коротко поширені ситуації.

Загалом аварії можна поділити на механічні та електричні.

До механічних належать: деформація/поломка валу ротора, ослаблення кріплення осердя статора до станини, ослаблення пресування осердя ротора, руйнування сепаратора, кільця чи кульки в підшипниках, накопичення пилу і бруду в рухомих елементах тощо [2,5].

Причинами більшості механічних аварій є радіальні вібрації через асиметрію напруги живлення (перекіс фаз), механічні перевантаження на валу двигуна, брак комплектуючих елементів, допущені похибки при збірці вузлів. До 10% механічних аварій АД пов'язані з асиметрією фаз і лише 2% пов'язані з механічним перевантаженням. Оцінити ймовірність виникнення механічних аварій важко, тому що зазвичай вони мають приховані причини, та виявляються лише після випробувань, або розборки двигуна. Проте постійний контроль мережевого навантаження і навантаження на валу зводить таку ймовірність до мінімуму.

Електричні аварії бувають 3 типів:

- мережеві (через напругу), що пов'язані з аваріями в електромережі;
- струмові, що пов'язані з обривом провідників в обмотках статора, ротора або кабелю, замиканням обмоток, порушенням контактів і руйнуванням з'єднань, виконаних шляхом спаювання чи зварювання; пробоем ізоляції внаслідок критичного нагріву, що спричиняється струмами перенавантаження чи короткого замикання;
- аварії, що пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, зношування чи потрапляння вологи.

Аналіз впливу якості напруги живлення (див. рис.1), як достатньо поширеного чинника, показує, що зменшення напруги живлення неминуче призводить до зростання струму в обмотках статора, що в свою чергу, веде до суттєвого перегріву ізоляції обмоток, а від так – до прискореного старіння та скорочення терміну експлуатації. Підвищення ж напруги живлення призводить до зростання магнітного потоку статора, струму намагнічування, інтенсивному перегріву осердя, підвищенню споживаної з мережі реактивної потужності, а відповідно, зниженню коефіцієнта потужності.

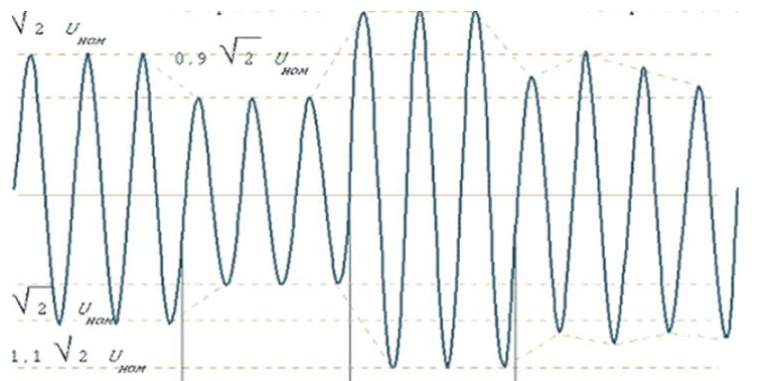


Рис. 1. Відхилення мережевої напруги

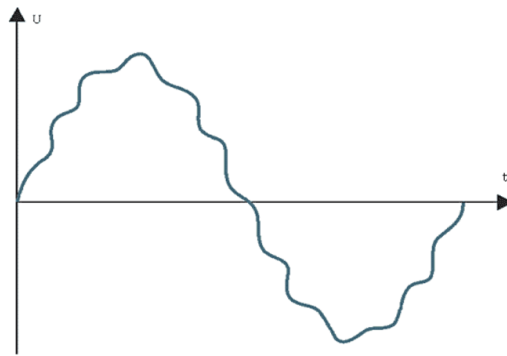


Рис. 2. Несинусоїдальність напруги

Постійний контроль наявності та якості мережевої напруги, включаючи гармонічний аналіз, контроль за його змінами під час роботи АД, у т.ч., за змінами параметрів фазних напруг, відповідно до режимів роботи самого двигуна, дозволяє уникнути переходу до аварійного режиму.

Для ефективного захисту АД надзвичайно важливо якомога точніше контролювати фазні струми в обмотках статора, оскільки вони тісно пов'язані з напругою на фазних обмотках статора, а тому, будь-які, навіть незначні відхилення мережевої напруги призводять до значної зміни фазних струмів. Так, наприклад, тривала робота АД із струмовим перевантаженням лише на 5 % від номінального скорочує термін експлуатації двигуна в 10 разів [6].

У зв'язку з суттєвою несинусоїдальністю кривої струму (рис. 2), особливо під час пусків, в ній присутня значна кількість гармонік вищого порядку, що істотно впливає на величину діючого значення струму. Тому, якщо приймати рішення про роботу АД не по обчислених діючих значеннях струму, а по деяких усереднених сигналах або, що ще гірше, по пікових значеннях, це може привести до неправдивих висновків про наявність або відсутність струмового перевантаження.

Більшість струмових аварій АД, насамперед, пов'язана з ушкодженнями в самому двигуні. При цьому створюється значна асиметрія фазних струмів, яка перевищує у декілька разів асиметрію напруги. Тому постійний контроль струмів, співвідношення струмового перекосу з перекосом напруги дозволяє робити достовірні висновки про наявність таких аварійних ситуацій та вчасно відключати двигун. [7]

В процесі експлуатації ізоляція АД неминує старіє. Головними причинами, що викликають такі процеси, є: нагрівання обмоток робочими та пусковими струмами, струмами короткого замикання та перевантаження, теплом від сторонніх джерел; динамічні зусилля, що виникають при взаємодії провідників із струмом; комутаційні перенапруження. Значний вплив здійснюють також умови довкілля: наднормативна температура і вологість повітря, забрудненість і запиленість. Отже, стан ізоляції істотно визначає міру безпечної експлуатації електроустановок.

Вірогідність пробою ізоляції зростає на порядок, якщо опір ізоляції в два рази менше за допустимий. При зниженні опору ізоляції виникає висока вірогідність появи такої важкої аварії АД, як пробій обмотки статора на корпус (коротке замикання на корпус), небезпечної не лише для самого електродвигуна, а й для обслуговуючого персоналу.

ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНА

В основу більшості засобів із захисту АД від теплового перевантаження покладаються теплові математичні моделі двигунів. [2]

Головною характеристикою навантажувальних режимів є теплова характеристика електродвигуна. Робота АД завжди супроводжується його нагріванням, що обумовлено відповідними процесами та втратами енергії. Нормативний термін служби електродвигуна визначається, в кінцевому рахунку, допустимою температурою нагріву його ізоляції. Перевищення допустимої температури веде до передчасного руйнування ізоляції та істотного скорочення терміну служби двигуна.

Зазвичай аварійні режими АД супроводжуються перевищенням температури в обмотці статора. При нагріванні в електричній ізоляції відбуваються незворотні фізико-хімічні процеси, що призводять до її прискореного старіння, тобто поступової втрати механічної міцності та ізолюючих властивостей. Температура нагріву обмоток суттєво залежить від теплотехнічних характеристик електродвигуна та параметрів довкілля. Перегрів понад норму на кожні 8–10°C скорочує термін служби ізоляції обмоток електродвигуна в два рази.

Якщо ж перевищення температури над допустимим значенням незначне, то старіння ізоляції відбувається досить повільно. Потрібен певний час, перш ніж статор і ротор нагріються до граничної

температури, відповідно немає необхідності у тому, щоб захист реагував на кожне перевищення струму, а лише коли виникає небезпека швидкого зносу ізоляції. В окремих випадках нагрів навіть понад нормоване значення є припустимим.

В залежності від характеру навантаження, в цілому, розрізняють наступні режими роботи АД: тривалий, короткочасний, повторно-короткочасний та змішаний.

Найбільш характерним є режим роботи АД із стримкозмінним навантаженням, коли двигун періодично входить в режим перевантаження, повертаючись потім до номінального режиму або знижуючись до режиму роботи з навантаженням менше за номінальне.

Якщо машина працює в тривалому режимі, але із змінним навантаженням P_j (див. рис. 3), має місце несталий тепловий процес, оскільки у відповідні проміжки часу t_j відбуваються різні втрати потужності, а отже, і різні теплові втрати.

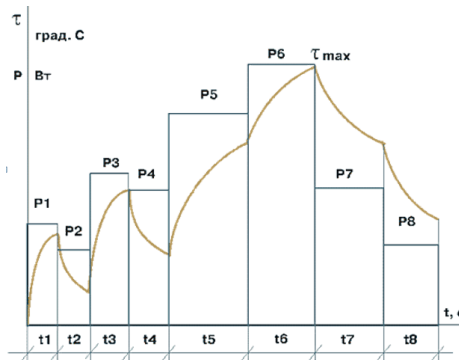


Рис. 3. Характер зміни температури двигуна при зміні навантаження

Для якісного та ефективного контролю рівня тепла, що накопичується двигуном в процесі роботи, важливо дослідити закони нагрівання та охолодження двигуна. У зв'язку із складнощами проведення ґрунтовного аналізу, та враховуючи доцільність проведення технічних розрахунків без отримання суттєвої похибки, було введено ряд припущень: двигун розглядається як однорідне тіло, яке має нескінченно велику теплопровідність та однакову температуру в усіх точках своєї конструкції; теплоємність двигуна та його коефіцієнт тепловіддачі не залежить від навантаження на валу двигуна; температура двигуна залежить не тільки від навантаження, але і від температури навколишнього середовища.

Середня температура двигуна пропорційна кількості тепла Q , яке накопичується ним:

$$t = \frac{Q}{C}, \quad (1)$$

де C – теплоємність двигуна.

Втрати тепла двигуном пропорційні його температурі:

$$\frac{dQ}{dt} = -A t = -A \frac{Q}{C}, \quad (2)$$

де A – тепловіддача двигуна.

Якщо вважати, що до вмикання двигун був холодним, то головне теплове рівняння під час роботи двигуна має вигляд:

$$\frac{dQ}{dt} = -A \frac{Q}{C} + I^2 R, \quad (3)$$

де $I^2 R$ – потужність втрат на нагрів двигуна в обмотках з активним опором R .

Рішення рівняння (3) при незмінному струмі I має вигляд:

$$Q t = Q_0 (1 - e^{-tA/C}), \quad (4)$$

де $Q_0 = I^2 R \cdot C/A$ – кількість тепла в двигуні при $\frac{dQ}{dt} = 0$.

Гранично допустимому струму двигуна $I_{\text{ном}}$ відповідає гранично допустима кількість тепла.

$$Q_{\text{ном}} = I_{\text{ном}}^2 R \cdot C/A, \quad (5)$$

та гранично допустима температура (відносно навколишнього середовища):

$$t_{\text{НОМ}} = \frac{Q_{\text{НОМ}}}{C} = I_{\text{НОМ}}^2 \cdot R/A. \quad (6)$$

Отже, при вмиканні двигуна з незмінним струмом, який перевищує $I_{\text{НОМ}}$ в N разів, час виходу на гранично допустиму кількість тепла $Q_{\text{НОМ}}$ визначається виразом:

$$T_N = \ln N^2 - \ln N^2 - 1 / (A/C). \quad (7)$$

Розрахунок тепла, що виділяється струмом в обмотці, з врахуванням швидкості нагріву та охолодження двигуна при якомога більшій степені дискредитації вимірювань, дає найбільш повну картину про кількість тепла, накопиченого двигуном та небезпечного з точки зору допустимого перегріву ізоляції. При перевищенні допустимого нагріву для певного класу ізоляції відбувається так зване прискорене «старіння» ізоляції: знижується механічна міцність, з'являється крихкість, розлами і тріщини, що призводить до зниження її електричної міцності та, в кінцевому рахунку, до пробою.[2]

ЗАХОДИ ТА ЗАПОБІЖНІ ЗАСОБИ ЗАХИСТУ ВІД АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ АД

Високі показники надійності та довговічності АД можливі тільки за умови їх роботи при номінальних або близьких до них режимах, що можна забезпечити лише завдяки належному захисту.

Для захисту АД від аварійних режимів застосовують наступні засоби:

- теплові захисні пристрої: теплові реле, розгалужувачі;
- струмочутливі захисні пристрої: плавкі запобіжники, автомати;
- термочутливі захисні пристрої: термістори, термостати;
- захист в електромережі - реле напруги і контролю фаз, монітори мережі;
- прилади максимального струмового захисту, електронні струмові реле;
- комбіновані пристрої захисту.

Проте багаторічний досвід експлуатації АД показує, що більшість існуючих засобів захисту не забезпечує абсолютно безаварійну роботу АД. Так, наприклад, теплові реле розраховують на тривале перевантаження 25 - 30% від номінального, але, найчастіше, вони спрацьовують при обриві однієї фази при навантаженні 60% від номінальної. При меншому навантаженні реле не спрацьовує і АД продовжує працювати на двох фазах і виходить з ладу в результаті перегріву ізоляції обмоток.

Усі захисні пристрої мають служити для швидкого, впродовж часток секунди, визначення характеру і міри uszkodження двигуна, локалізації аварійної ділянки шляхом відключення її від іншої схеми електропостачання. Проте, кожний з перерахованих засобів має ряд істотних недоліків, які впливають на якість роботи АД: одні відрізняються невиправданою вибірковістю, у інших відсутнє відстроєння від процесу пуску, треті не реагують на струми КЗ або перевантаження і т.д.

Для того, щоб вірно обрати захисний пристрій, необхідно знати, як і від яких аварій захищає певний пристрій, принцип його дії та конструктивні особливості.

Запобіжники є неодмінними засобами, що призначені для захисту електричних мереж від перевантажень та коротких замикань. Але звичайні запобіжники здатні захистити АД тільки від струмів короткого замикання, що в 10-100 разів перевищують номінальні струми. Струми ж перевантаження або інші струмові аварії вони сприймають як пускові струми, не реагуючи на них. Тому, у кращому випадку, вони здатні відключити електродвигун тільки через кілька хвилин, що цілком може призвести до перегріву обмоток і до аварії АД.

Звичайні запобіжники не здатні захищати від аварій, що пов'язані з аваріями в мережі напруги та від аварій, пов'язаних з порушенням режимів роботи АД або тепловим перевантаженням, а також від режиму холостого ходу двигуна. До того ж, при однофазному КЗ, а іноді при надмірному перекосі фаз вони відключають одну фазу, що призводить до аварійного режиму роботи на двох фазах. Для захисту від перевантаження слід використовувати інші пристрої.

Автоматичні вимикачі (автомати) призначені для включення та відключення АД і інших приймачів електроенергії, а також для захисту їх від струмів перевантаження і КЗ. Автомати забезпечують одночасне відключення усіх трьох фаз у разі виникнення аварійних ситуацій. Вибір здійснюється за номінальним струмом, характеристичі спрацьовування, умовам монтажу та експлуатації. Вірний вибір характеристик автомата є надійною запорукою його своєчасного спрацьовування.

Мотор-автомати були розроблені спеціально для захисту електродвигунів, які на відміну від стандартного автомата, мають цілий ряд переваг, насамперед: високу електродинамічну стійкість до 100 кА; кнопки управління електроприводом на корпусі; додаткові контакти, що спрацьовують при перевантаженнях або КЗ.

Універсальні автоматичні вимикачі. Рознесення функцій захисних пристроїв на декілька незалежних пристроїв створює масу незручностей при монтажі і експлуатації. Кожна з них не є універсальною і підходить тільки до конкретного автоматичного вимикача. Тому, постала гостра проблема створення універсального пристрою. Останні покоління автоматичних вимикачів забезпечені електронними розділювачами, що здійснюють комплексний захист електродвигуна і об'єднують в одному облаштуванні функції усіх розділювачів. Вони виконані на базі мікропроцесорної техніки, гарантують високу точність спрацьовування, надійність і стійкість до температурних режимів.

Термочутливі захисні пристрої відносяться до вмонтованого теплового захисту електродвигуна. Вони розташовуються в спеціальних гніздах лобових частин АД (здійснюють захист від заклинювання ротора) або безпосередньо в обмотках електродвигуна. Серед них використовуються: **термістори** – напівпровідникові резистори, що змінюють свій опір залежно від температури, та **термостати** – біметалічні вимикачі з двох пластин з різним коефіцієнтом теплового розширення, що спрацьовують при досягненні критичної температури. Термістори, в свою чергу поділяють на два класи: **PTC** – резистори з позитивним температурним коефіцієнтом опору (ТКО) та **NTC** – резистори з від'ємним ТКО. Більшою мірою використовуються **PTC – позистори**, які мають властивість різко збільшувати свій опір, при досягненні критичної температури. Для двигуна – це максимально припустима температура нагріву обмоток статора певного класу ізоляції. Такий захист є ефективним, коли неможливо за струмом визначити з достатньою точністю температуру двигуна. Це стосується передусім двигунів з тривалим періодом запуску, частими операціями включення і відключення (повторно-короткочасний режим) або двигунів з регульованим числом обертів (за допомогою перетворювачів частоти). Термісторний захист є ефективним також при сильному забрудненні двигунів або виході з ладу системи примусового охолодження. Недоліком є відносна інерційність температурної характеристики термістора і залежність від температури довкілля та умов експлуатації АД. Термостати (реле температури) – реагують на наднормативні підвищення температури обмоток статора. При перевищенні критичної температури обмотки розривається коло в схемі управління, що призводить до відключення двигуна.

Більшість захисних пристроїв, які працюють за принципом виміру теплової дії струму, погано реагують на ситуації, що пов'язані з аваріями мережевої напруги. Для цього необхідні реле напруги та контролю фаз.

Як показує статистика, значна частина аварій АД пов'язана саме з аваріями мережевої напруги. Тому, найбільш доцільне застосування так званих моніторів напруги, що контролюють одночасно декілька видів мережевих аварій. Більшість реле напруги не мають такої універсальності. Одні контролюють тільки обрив фаз, інші – перевищення або пониження напруги, треті – перекіс фаз і т.д. Це призводить до необхідності використання декількох аналогічних реле одночасно, що ускладнює та здорожує схему, знижує надійність. Більш детально з видами аварійних ситуацій та засобами захисту від них можна ознайомитися в роботі [2].

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Враховуючи широке розповсюдження та масове використання АД, пріоритетною вимогою до фахівців є забезпечення умов для оптимальної безаварійної експлуатації та підвищення термінів служби АД, економного споживання електроенергії, скорочення витрат на капітальний ремонт.

Слід констатувати, що реальні умови експлуатації АД, зазвичай, більшою чи меншою мірою далекі від нормативних. Тому кваліфікований та обґрунтований вибір необхідних заходів та захисних засобів з урахуванням специфіки процесів в двигуні та результатів аналізу теплової моделі двигуна, особливостей режимів роботи та умов експлуатації, небезпечних факторів, можливих загроз, які можуть стати каталізаторами переходу до аварійних режимів роботи, є найважливішим чинником в забезпеченні тривалої та безпечної експлуатації АД.

Багаторічний досвід експлуатації АД показує, що більшість існуючих засобів захисту не забезпечує абсолютно безаварійну роботу АД. Повноцінний захист здатні здійснювати лише пристрої, які спроможні не тільки контролювати мережеву напругу та фазні струми в обмотках АД, а й, співставляючи ці параметри між собою, робити висновки про наявність тієї чи іншої аварійної ситуації.

Подальший розвиток захисних засобів є перспективним у створенні якісних і недорогих засобів плавного управління пуском і регулювання швидкості обертання АД, при збереженні усіх функцій захисту. Такі пристрої повинні виявляти більшість причин, які ведуть до виникнення критичних режимів шляхом зміни напруги та частоти живлячої мережі. Вони дозволять оптимізувати роботу АД в різних режимах, забезпечити плавний пуск, безступеневе регулювання швидкості, рівномірне обертання двигуна в зоні переважань, високі показники ефективності (ККД і коефіцієнт потужності), покращити динаміку роботи електроприводу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Асинхронна машина [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>.
2. Соркінд М. Асинхронные электродвигатели. Аварийные режимы работы. – М.:Новости электротехники, № 2(32), № 3(33), №4(34), 2005.
3. Стадній О. Ю. Аномальні режими роботи двигунів / Матеріали XLVII НТК ВНТУ, м.Вінниця, 23. 03. 18 р.
4. Грундулис А.О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1998. – 288 с.
5. Кондратюк О.Ю. Анализ аварийных режимов работы асинхронных двигателей к вопросу выбора их эффективной защиты: статья / Кондратюк О.Ю., Егоров А.Б. – Харьков: Укр. инж.-пед. академия, 2006. – 8 с.
6. Кацман М.М. Электрические машины. – М: Высш. шк., 2000. – 324 с.
7. Брускин А.Э. и др. Электрические машины и микромашины. – М: Высш. шк., 2001. – 426 с.
8. Гетманенко В. М. Устройство для защиты асинхронного электродвигателя: статья / Гетманенко В. М., Иваница М. А. – Научный журнал КубГАУ, №73(09), 2011.
9. Міліх В.І. Дослідження асинхронних двигунів: Лаб. пр. з курсу «Електричні машини» / Міліх В.І., Іваненко В.М. – Харків: НТУ «ХП», 2007.– 93 с.
10. Gedzurs A. Temperature protection methods of induction motor / Gedzurs A. – Research for rural development 2015, Latvia University of Agriculture, 2015. – P. 258-263.
11. Защита от аварийных режимов работы асинхронных электродвигателей [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://torus.pp.ua/manuals/articles/motor-protection/>

Надійшла до редакції 27.01.2019

СТАДНІЙ ОЛЕКСАНДРА ЮРІЇВНА – бакалавр , ФКСА, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: alix.stadny@gmail.com

ВАСЮРА АНАТОЛІЙ СТЕПАНОВИЧ – д.т.н., професор кафедри автоматичної та інформаційно-вимірювальної техніки, м. Вінниця.

ДОРОЩЕНКОВ ГЕННАДІЙ ДМИТРОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри лазерної та оптикоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.