

СИСТЕМА ЗАХИСТУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З РЕГУЛЬОВАНОЮ УСТАВКОЮ ВІДКЛЮЧЕННЯ

Лашко Ю.В., Чорний О.П., к.т.н

Кременчуцький державний політехнічний університет

Україна, 39601, Кременчук, вул. Першотравнева, 20, КДПУ, кафедри “Комп’ютерні і інформаційні системи”, “Системи автоматизованого управління і електропривод”

Дано обґрунтування необхідності удосконалення пристроїв захисту електродвигунів, які працюють за упереджувачим принципом. Запропоновано захист із регульованою уставкою, оснований на застосуванні енергетичного показника якості перетворення енергії.

Дано обоснование необходимости усовершенствования устройств защиты электродвигателей, работающих по предупреждающему принципу. Предложена защита с регулируемой уставкой, основанная на использовании энергетического показателя качества преобразования энергии.

В практиці експлуатації прийнято вважати, що ефективність роботи усього електротехнічного обладнання й особливо систем електропривода, що використовують електричну енергію змінного струму, в певній мірі визначається якістю електричної енергії в мережах живлення. Якість використовуваної електроенергії визначається існуючим ГОСТ на електроенергію 13109-97, Європейським стандартом EN50.006, міжнародними стандартами МЕК 861, МЕК 1000-3-2, МЕК 1000-3-3, МЕК 1000-4-1.

Ці нормативні документи визначають вплив якості електроенергії на справний, електрично і магнітно-симетричний електромеханічний перетворювач, але тільки в частині збільшення додаткових втрат і нагріву. По суті, ГОСТ показує зниження ККД і вихід його з ладу через перегрів, але зовсім не враховує ту частину енергії, яка перетворена електромеханічним перетворювачем, але йде не на виконання корисної роботи, а, наприклад, на вібрацію.

Регламентована державними стандартами якість електричної енергії визначає режими роботи електродвигуна при неякісності з боку мережі, тоді як якість перетворення енергії дозволяє визначити параметри та реальний технічний стан електричної машини [1]. Перетворення енергії не може бути якісним, якщо параметри електродвигуна у ході ремонту [2] або під час експлуатації [3] змінилися і його реальний технічний стан не відповідає каталожному чи зазначеному у паспорті. З одного боку це проявляється у несиметрії, несинусоїдальності струмів фаз, появі змінних складових споживаної потужності та електромагнітного моменту, що приводить до збільшення втрат активної енергії і споживання реактивної потужності, у зменшенні строку служби, а з другого – негативно впливає на інші споживачі, які підключені до мережі. Зазначені аспекти вказують на необхідність розгляду питання якості перетворення енергії електродвигуном з наступних позицій:

- неякісність мережі при якісному двигунові;
- якісність мережі при неякісному двигунові;
- неякісність мережі та неякісність двигуна.

Для першого випадку режими роботи двигунів вивчені досить добре і розглянуті в технічній літературі. При цьому визначені межі ефективної експлуа-

тації відповідними коефіцієнтами, регламентованими ГОСТом на якість електричної енергії. Випадок неякісності з боку електродвигуна практично не розглянуто. Хибно вважають, що відремонтований двигун для якого відхилення параметрів задовольняє встановленим нормам (ГОСТ 183-74, “Машины вращающиеся электрические. Общие технические требования”) – це симетрична машина. Дослідженнями встановлено, що взаємодія навіть допустимих відхилень приводить до виникнення таких енергообмінних процесів, які ведуть до невірності електромагнітної та механічної систем, природного зношення і фізичного старіння елементів конструкції, підвищеного нагріву та збільшення рівня вібрації, температурного переродження ізоляційних, провідникових і конструкційних матеріалів із незворотними змінами їх електричних, магнітних і механічних характеристик [3] та пов’язані з виникненням аварійних режимів роботи електродвигунів, аварій та виходу з ладу.

Для визначення таких процесів введені показники якості перетворення енергії [1]:

- коефіцієнт енергетичних втрат або коефіцієнт ефективності використання споживаної енергії, який, власне кажучи, є коефіцієнтом корисної дії. Цей показник може характеризувати машину в цілому й по кожній фазі;
- коефіцієнти нерівномірності завантаження фаз струмом і нерівномірності тепловиділення в обмотках;
- коефіцієнт якості змінювання моменту (відношення середнього моменту до середньоквадратичного);
- коефіцієнт, який відображає погіршення вібраційних характеристик електричної машини
- коефіцієнт імперативних утрат, який визначає відношення втрат, які йдуть на нагрів ізоляції до загальних втрат потужності;
- показник, який враховує нелінійні властивості елементів, що входять до механізму перетворення;
- показник, який визначає нерівномірність розподілу втрат у сталі. Цей показник в значній мірі проявляється в електричних машинах, які пройшли ремонтні операції з заміною обмоток;
- показник, який характеризує несиметрію магнітної системи двигуна. Проявлення цієї неякісності, як

правило пов'язано або з дефектами виробництва двигуна, або з його зношенням, тобто фізичним старінням. В рівній мірі несиметрія відноситься й до електричних параметрів (опорів, індуктивностей тощо).

Застосування показників дозволяє визначити вид неякісності двигуна, відділяючи вплив неякісності електричної енергії. Це надає можливість індивідуальної оцінки надійності окремих елементів конструкції двигуна: механічної системи, умов охолодження, ізоляції провідників обмоток тощо; характеру і динаміки розвитку теплових, електромагнітних, механічних процесів, виникнення і проявлення пошкоджень; прогнозу технічного стану та терміну його експлуатації.

Вирішення зазначених задач відкриває нові можливості щодо контролю поточного стану електродвигунів та створення систем діагностики, моніторингу та захисту. Зокрема, проблема зниження ефективності та надійності експлуатації електродвигунів пов'язана з проблемою виникнення аварійних режимів їх роботи та аварійної зупинки двигунів.

Задачі захисту, відповідно до концепції його побудови, зводяться до визначення пошкоджень електродвигунів, їх ідентифікації та відключення пошкодженого двигуна від мережі живлення з метою збереження функціонування його непошкодженої частини, що й визначає один із суттєвих і головних недоліків існуючих систем захисту - реалізацію захисту за принципом спрацювання за фактом настання аварійно небезпечного або аварійного режиму роботи електродвигунів без урахування його реального технічного стану.

Регламентований ПУЕ захист від міжфазних коротких замикань, замикань на землю, двофазних замикань на землю, перевантаження та мінімальної напруги, спеціальні захисти від обриву фази, обмеження числа пусків, мінімального струму і потужності, заклинювання та гальмування ротора у сукупності знижують ймовірність виникнення серйозної аварії, але не дозволяють однозначно вирішити питання захисту електричних машин та систем електропривода, що підтверджує статистика аварійності електрообладнання.

Технічний стан електродвигунів визначається значеннями певних технічних параметрів відповідно яким виконується настройка параметрів і уставок спрацювання захисту. При цьому, для захисту застосовується певна обмежена кількість технічних параметрів, а його настройка виконується на момент підготовки машини до експлуатації відносно номінальних параметрів двигуна і змінюється лише тільки після проведення його сертифікації.

Зазначені обставини визначають актуальність питань захисту електродвигунів та вказують на обмеженість існуючої концепції побудови пристроїв захисту та автоматики, в тому числі сучасних пристроїв, реалізованих на мікропроцесорній елементній базі.

Очевидно, що для підвищення ресурсу та надійності електрообладнання, зменшення витрат, пов'язаних із ремонтом і простоями, необхідно вирішувати питання удосконалення пристроїв захисту [4]. Такі пристрої [4-5] повинні ефективно функціонувати на основі реальної інформації в технологічній обста-

новці, що постійно змінюється, ґрунтуватися на фізичній суті процесів, що протікають в електродвигунах, володіти спроможністю упереджувати розвиток нештатного режиму роботи електрообладнання шляхом оцінки ступеню й динаміки зміни режиму та змінювати уставки захисту.

Захист із зазначеною сукупністю функціональних задач формує новий клас пристроїв захисту – інтелектуальний захисний пристрій (ІЗП) [4]. Інтелектуальний захисний пристрій - це апаратно-програмний модуль [4], який містить сукупність засобів підтримки контролю та оперативного управління системою захисту. Принципи побудови алгоритмів роботи ІЗП можуть бути різними, але склад апаратного забезпечення залишається незмінним. Такий підхід до побудови ІЗП узгоджується з принципами побудови мікропроцесорних пристроїв захисту та в жодному разі не “відкидає” існуючі пристрої захисту.

Реалізація захисту з регульованою уставкою спрацювання забезпечує реагування та адаптацію функції захисту на будь-яку зміну параметрів мережі, технічного стану двигуна та навантаження, що забезпечує спрацювання ІЗП за упереджуючим принципом.

Як зазначалося, фізичні процеси, що протікають і виникають у двигуні під час його експлуатації, формують його режим роботи (перехідний, сталий, перед-аварійний, аварійний) та являються основними причинами відхилень режимів роботи двигуна від нормованих і, як наслідок, приводять до виникнення аварійно небезпечних режимів роботи, пошкоджень, серйозних аварій та виходу машини з ладу. Ці причини пов'язані з проблемою своєчасного визначення аварійної ситуації та дефіцитом часу в зв'язку з можливим швидким розвитком аварійно небезпечних процесів. Так, за методикою настройки максимального за струмом захисту (МСЗ), який, як правило, виконується трифазним і з двома або трьома сходами, на підставі технічної документації на двигун та відповідно до стандартів МЕК, визначаються характеристики “час-струм”. Результатом настройки являються обрані параметри струму та часу спрацювання кожної сходки захисту. При цьому, слід відмітити, що загальновідомим недоліком МСЗ являється те, що він не в повній мірі використовує перевантажну спроможність двигуна в області малих надструмів та не враховує попереднє навантаження та температуру навколишнього середовища [6]. Перший недолік ще більш проявляється при зміні перевантажної спроможності двигуна під час його тривалої експлуатації, наприклад, через розглянуті вище причини, пов'язані з технічним станом АД, впливом динамічних сил тощо.

У формалізованому вигляді розглянемо ситуацію виникнення “одноразового” та тривалого перевантаження, причина виникнення якого може бути викликана як з боку мережі, так і з боку двигуна. Для зручності вважимо, що перевантаження відбулося в установленому режимі роботи АД і не є визначним для спрацювання захисту, наприклад, МСЗ, тобто навантаження змінилося, як наслідок змінився струм, але його величина не досягла значення уставки. Скористаємося узагальноною схемою, наведеною на рис. 1 відповідно даній ситуації.

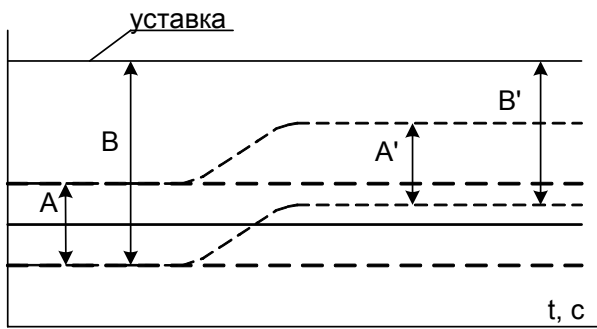


Рис. 1

На рис. 1 зона А являє собою зону, в якій значення струму коливається навколо заданого або номінального значення відповідно до технічних умов, а зона В являє зону допустимої роботи двигуна – зону запасу працездатності, яка обмежена зверху величиною уставки. У випадку зміни режиму роботи двигуна, у наслідок перевантаження, межі зони А зсуваються, при цьому, її ширина може лишитися такою самою або змінитися (нова зона А позначена через А'). Відповідно до цієї ситуації зміниться й ширина зони В (нову зону позначено через В'), причому її верхня межа лишилася на тому ж рівні – на рівні уставки. У такому випадку двигун продовжує працювати (величина струму не досягла уставки спрацювання) в новому режимі, який вже не є нормальним, але допустимим з точки зору захисту і небезпечним з точки зору виникнення аварійно небезпечного режиму роботи АД, що може бути у подальшому причиною його аварійної зупинки. Небезпечність полягає в тому, що перехід до нового режиму пов'язаний із процесами перерозподілу енергетичних і теплових потоків [3], які по різному можуть впливати на конструктивні частини двигуна, в результаті чого новий усталений режим характеризується новими характеристиками та параметрами. Причому, дія цих динамічних впливів на конструктивні частини двигуна є різною, зокрема їх наслідки для нового двигуна – одні, а для двигуна, який пройшов капітальний ремонт та для двигуна, який експлуатувався тривалий час – інші.

З викладеного можна зробити наступні висновки. Зона А обумовлюється паспортом машини та передбачуваними технічними умовами експлуатації, відповідно до яких, разом з існуючими методиками, по суті, визначається зона В, яка зверху обмежена величиною уставки. Слід підкреслити, що обчислення та вибір уставок за цими методиками ґрунтується, як правило, на застосуванні номінальних параметрів та характеристик двигуна, які під час експлуатації змінюються – змінюється його реальний технічний стан, що приводить до зсуву та зміни зони А - появи зони А' при тій самій допустимій зоні В. Отже, відповідно до реального технічного стану двигуна повинна бути визначена уставка, що приведе до встановлення нової зони В (це зона В'). Як відомо, системи захисту не передбачають ситуацій, подібних розглянутому випадку, що зокрема визначає та обумовлює один з недоліків існуючих принципів побудови захисту.

Розроблений метод змінювання уставки реалізується виразом:

$$I'_y = I_y \cdot (2 - \max_{j=A,B,C} \{K_{\text{нпс}(j)}\}), \quad (1)$$

де I_y - величина уставки за струмом, значення якої визначається за паспортом АД, передбачуваними умовами експлуатації та відповідною методикою;

I'_y - нове значення уставки;

$$K_{\text{нпс}(j)} = \frac{3 \cdot \sqrt{\sum I_n^2(j)}}{\sqrt{\sum I_n^2(A) + \sum I_n^2(B) + \sum I_n^2(C)}} - \text{зна-}$$

чення показника завантаження фаз ($j = A, B, C$) струмом, визначені за n гармоніками у поточному режимі роботи двигуна.

Зміна значення уставки за виразом (1) відбувається тільки за умови $K_{\text{нпс}(j)} > 1$, тобто за умови перевантаження будь-якої фази ($j = A, B, C$) струмом, враховуючи режими роботи АД, які менші за номінальний. Саме виконання цієї умови являється ознакою того, що поточний режим може бути небезпечним і потребує зміни уставки спрацювання. Значення, що обчислюється в дужках виразу (1) й являється величиною, на яку змінюється уставка.

Процес змінювання уставки захисту ілюстрований рис. 2-3. Наведені залежності отримані шляхом моделювання роботи АД 4А132М4, 11кВт за даними [7] для випадків: 1) імітації виникнення при $t = 7.2$ с. несиметрії напруги живлення величиною $k_{2U} = 2\%$ - рис. 2; 2) імітації виникнення несиметрії напруги живлення за умов випадку 1, але з попередньою імітацією виникнення в момент часу $t_{R1} = 5.2$ с. несиметрії активних опорів обмотки статора величиною у 5% - рис. 3.

З рис. 2-3 видно, що обидва випадки, за обраних умов моделювання, характеризуються певною зміною режиму роботи двигуна, що призводить до нерівномірного розподілення завантаження струмом фаз обмоток статора та відповідно до виразу (1) - зміні уставки спрацювання. Але, якщо зміна величини уставки спрацювання у випадку 1 не призведе до відключення двигуна від мережі живлення, то у випадку 2 це відключення повинно бути здійсненим.

Слід також зазначити, що відповідно ГОСТ 13109-97 значення $k_{2U} = 2\%$ являється допустимим і, зокрема, за параметром напруги живлення, характеризує якість електричної енергії, але відповідний йому вплив на енергетичні процеси, що протікають у двигуні буде в певній мірі шкідливим і буде проявлятися у несиметрії струмів фаз обмоток статора, як наслідок, у підвищенні утрат енергії та додатковому їх нагріву, появи струмів зворотної послідовності та підвищеному нагріву обмоток ротора, появи змінних складових у потужності та моменту й відповідному підвищенні рівня вібрацій. Звісно, у випадку 2 (первинній несиметрії фаз обмоток статора) зазначені проявлення зміни режиму та його наслідки будуть ще більш значними.

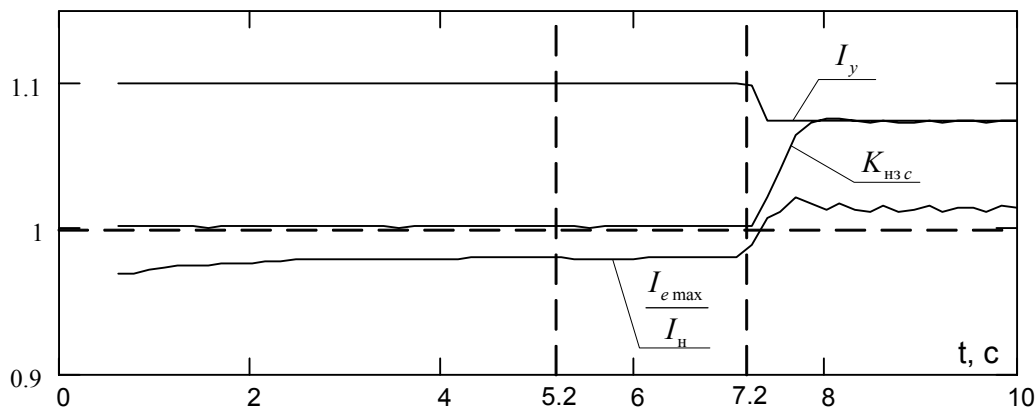


Рис. 2

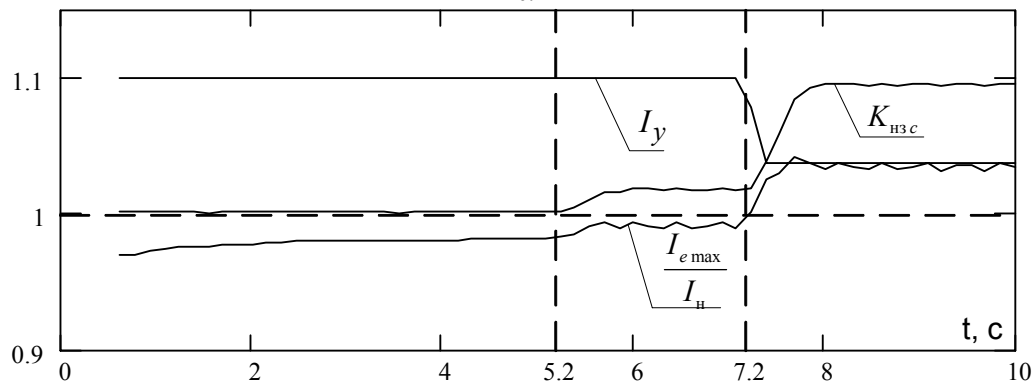


Рис. 3

Практична реалізація змінювання уставки спрацювання потребує вирішення двох питань: встановлення меж допустимої зони зміни показника $K_{нпс}$ та відокремлення відсічки за струмом від пускових режимів.

Перше питання пов'язане з визначенням можливих викидів значень показника $K_{нпс}$. Враховуючи, що необхідна точність обчислення застосованих для захисту енергетичних показників, до яких входить і показник $K_{нпс}$, у загальному випадку визначається потрібною точністю системи управління захистом, а час - обмежується її динамікою, точність розрахунку $K_{нпс}$ може бути малою – порядку $1/4-1/6$ допустимої зони.

Друге питання пов'язане з тим, що у пускових режимах струм на багато перевищує номінальний. Але застосування існуючих підходів щодо урахування пускового режиму, а також властивості показника завантаження фаз струмом $K_{нпс}$ у пускових режимах забезпечують вирішення цього питання.

Захист з регульованою уставкою спрацювання надає можливість упередження розвитку нештатного режиму роботи, шляхом оцінки ступеню і динаміки зміни режиму, враховує індивідуальні особливості двигуна, яких він може набути в процесі експлуатації, що забезпечує виконання своєчасних дій щодо відключення двигуна від мережі та, у свою чергу, обумовлює обсяги ремонтних робіт та втрати, що йдуть на відновлення працездатності машини.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Родькин Д.И., Черный А.П., Мартыненко В.А., Обоснование критериев качества преобразования энергии в электромеханических системах, Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету Вип. 1/2003 (18) – С. 80-85.
- [2] Прус В.В. Процесс старения электротехнической стали электродвигателей переменного тока во время ремонта. Сборник научных трудов Кременчугского государственного политехнического института: Выпуск 1/1998 (4). - Кременчуг: КГПИ, 1999. С.92-93.
- [3] Гуревич Э.И., Рыбин Ю.Л., Переходные процессы в электрических машинах. – Л.- Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1983. 216 с.
- [4] Лашко Ю.В., Чорний О.П. Побудова систем інтелектуального захисту асинхронних двигунів // Електроінформ. – 2004. - №3. – С.10-12.
- [5] Лашко Ю.В., Родькін Д.Й., Чорний О.П., Сидоренко В.М. Інтелектуальний захист електродвигунів з урахуванням критеріїв якості перетворення енергії, Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Електротехніка і енергетика", випуск 67. ДонНТУ, 2003, С. 113-116.
- [6] Шмурьев В.Я. Цифровые реле. Изд. Петербургского энергетического института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минтопэнерго РФ, Санкт-Петербург, 1999, 80 с.
- [7] Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. для вузов по спец. "Электрич. машины". - М.: Высш. шк., 1987. - 248 с.

Надійшла 14.10.2004