

Запропоновано рішення щодо зменшення впливу коливань напруги живлення на працездатність системи електропривода, що полягає у розробці системи, яка має здійснювати аналіз початкових умов гальмування, та виконувати його найбільш ефективним із зазначених методів.

Список літератури

1. **Волотковский С.А.** Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. - 389с.
2. **Синчук О.Н.** Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / **О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов.** Научное издание. – Київ: ІЕДНАУ, 2006. – 252с.
3. **Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н.** Подвижной состав электрифицированных железных дорог. - М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
4. **Алексеев Н.И.** Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
5. **Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В.** Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.
6. **Бирзникс Л.В.** Импульсные преобразователи постоянного тока. - М.: Энергия, 1974. - 256 с.
7. **Гриценко А.В., Козаченко Е.В.** Новые электрические машины локомотивов: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: ГОУ: Учебно-методический центр по оборудованию на железнодорожном транспорте, 2008. – 271 с.
8. Основы электрического транспорта: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / (М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др.); под общ. ред. М.А. Слепцова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
9. **Синчук О.Н., Синчук И.О., Юрченко Н.Н., Чернышов А.А., Удовенко О.А., Пасько О.В., Гузов Э.С.** Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов. – Київ: ІЕДНАУ, 2006. – 252 с.

Рукопис подано до редакції 22.04.16

УДК 622.625.28-83

Е.С. ГУЗОВ, канд. техн. наук, проф., І.О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц.,
Д.О. КАЛЬМУС, асистент, Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВОМУ ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНОЮ ОБМОТКОЮ ЗБУДЖЕННЯ

Аналіз парку електричних машин сучасних підприємств показує, що найбільш поширеними залишаються двигуни постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Наряду з існуючими перевагами яких, основним недоліком залишається складність переходу останніх в режим гальмування, та пов'язані з цим незручності в роботі транспортного засобу. Так один з найпоширеніших видів гальмування, як електродинамічне, обмежено значенням критичної частоти обертання, а режим противмикання – максимальним значенням струму гальмування. Тому для збереження ресурсу роботи двигунів та розширення діапазону застосування режиму динамічного гальмування, було проведено аналіз перехідних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження. Відзначено, що дослідження електромагнітних процесів даного виду електричних двигунів ускладнене, тим що в двигунах послідовного збудження магніторушійна сила, як наслідок, і магнітний потік змінюється із зміною струму якоря. Для можливості проведення досліджень було використано лабораторний стенд, який дозволив провести експеримент, та побудувати криву намагнічення. Було проведено її апроксимацію, та побудовано графіки. Аналіз графіків показує, що в зоні низьких швидкостей найбільш близьким є вираз гіперболічного синуса, а в зоні насичення гіперболічний. Отримані завдяки аналітичному виразу кривої намагнічення вирази дали можливість побудувати поверхні швидкості протікання електромагнітних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження в режимах противмикання та електродинамічного гальмування. Аналіз отриманих поверхонь показує, що перемикання з одного режиму електричного гальмування на інший буде супроводжуватись значними кидками струму двигунів, що не є бажаним та суттєво погіршує стан ізоляції обмоток двигуна, чим знижує його ресурс роботи та надійність електричного гальмування, від чого в значній мірі залежить ефективність роботи рудничного електровозу. Очевидним, також, є підвищений рівень пульсацій струму двигуна у такому режимі. Отримані результати формулюють основні вимоги до системи гальмування транспортного засобу, які полягають у розробці чіткого алгоритму функціонування такої системи.

Ключові слова: електромагнітний, тяговий двигун, надійність, електричне гальмування, електропривод

Проблема та її зв'язок з практичними завданнями. В теперешній час на переважній більшості транспортних засобів з електричним приводом ведучих коліс, в якості тягових двигунів (ТД) використовуються в основному електродвигуни постійного струму послідовного (переважно) або змішаного (рідше) збудження. В повній мірі це відноситься і до рудникових видів

електровозів [1]. Між тим, для двигунів послідовного збудження характерним є погіршення електромеханічних характеристик в процесі гальмування при зменшенні швидкості електровозу. Тому на практиці для зупинки електропотягів з вищезгаданими типами ТД застосовують не динамічне, як найбільш сприйнятне, а гальмування із противмиканням. При цьому спостерігається суттєве зростання рівня струму двигуна, що є причиною підвищеного нагрівання його обмоток з послідовним збільшенням вірогідності поломки.

Особливо це проявляється при маневрових роботах електропотягів, коли відбувається завантаження або розвантаження гірської породи у вагонетки. Тоді час роботи двигунів у режимі гальмування сягає понад 50 % загального часу. Саме тому режимам гальмування у процесі електровозного відкочування приділяється особлива увага, адже ефективне функціонування електричного обладнання електровозу без врахування особливостей цих режимів неможливе [1].

Аналіз досліджень та публікацій. Як відомо [1], досить ефективним видом електричного гальмування ТД постійного струму послідовного збудження тягових електроприводів рудникових електровозів як з реостатним способом керування рівнем напруги на затискачах двигуна, так і імпульсному є електродинамічне. Однак область його дії обмежена, та визначається зіставленням активних втрат у якорі двигуна та відповідної кривої намагнічення. А при реостатному гальмуванні, ще й спостерігається значне відхилення середнього значення струму гальмування від максимально припустимого. Тому, виникає потреба у гальмуванні локомотива механічними засобами протягом усього процесу електричного гальмування. Крім того, слід зазначити, що механічне гальмування рудникових електровозів необхідно для повної зупинки поїзда, при низькій швидкості руху, коли не настає самозбудження двигунів. Отже, як при реостатному, так і при імпульсному регулюванні рівня напруги на затискачах ТД послідовного збудження гальмування останніх настає тільки при частотах обертання перевищуючих критичне значення.

Аналіз досліджень показує, що надійне самозбудження ТД можна забезпечити шляхом створення початкового струму якоря.

Дійсно, початкове збудження ТД у режимі електродинамічного гальмування дозволяє значно зменшити інтервал швидкостей руху рудникових електровозів, при яким не відбувається самозбудження ТД. Однак існує декілька умов, від виконання яких залежить надійність гальмування.

Однією з таких умов є наявність залишкового магнітного потоку двигуна такого знаку, щоб, е.р.с. якоря, що наводиться їм, викликала струм збудження, що збільшує цей потік.

Іншою умовою самозбудження можна виділити те, що воно може настати тільки в тому випадку, якщо нахил лінійної частини залежності е.р.с. від струму збудження більше або збігається з нахилом прямої активних втрат контуру.

Для виконання першої умови самозбудження, як правило, здійснюють реверсування якірної обмотки або обмотки збудження двигуна.

Проаналізувавши другу умову самозбудження очевидно, що самозбудження двигуна в режимі гальмування при малих швидкостях обертання якоря ускладнило навіть при невеликих значеннях опору гальмівного резистора.

Для прискорення процесу збудження потрібен початковий струм у силовому ланцюзі електропривода. Найчастіше для надійного збудження двигунів застосовують ініціацію струму збудження від додаткового джерела живлення, наприклад, акумуляторної батареї або за рахунок енергії заряду конденсатора.

Аналізуючи розглянуті вище рішення, слід зазначити, що всі вони потребують залучення додаткових силових елементів, необхідних для досягнення поставленої мети, тому й не знаходять широкого застосування на практиці.

Постановка завдання. Провести аналіз електромагнітних процесів у двигуні постійного струму з послідовною обмоткою збудження при електричному гальмуванні тягових двигунів рудничного електровозу з розробкою рішень щодо забезпечення надійного гальмування.

Викладення матеріалу та результати. Електромагнітні процеси в колі якоря двигуна постійного струму з послідовною обмоткою збудження описує система рівнянь

$$\begin{cases} U + E - iR - L \frac{di}{dt} = 0 \\ E = k\Phi(i)\omega \end{cases} \quad (1)$$

де ω, i та $\frac{di}{dt}$ – швидкість, струм двигуна та його похідна відповідно; U – напруга живлення; $k\Phi(i)$ – коефіцієнт магнітного потоку; R та L – відповідно активний та індуктивний опір кола гальмування.

При дослідженні перехідних режимів суттєве значення відіграє швидкість протікання електромагнітних процесів у колі двигуна, яка у наведеному вище виразі представлена першою похідною струму. Скористаємося даною залежністю для аналізу режиму гальмування.

Так для режиму противмикання справедливим є вираз [2]

$$\frac{di}{dt} = (U + k\Phi(i)\omega - iR)/L. \quad (2)$$

Тоді для режиму динамічного гальмування:

$$\frac{di}{dt} = (k\Phi(i)\omega - iR)/L. \quad (3)$$

Але для двигуна постійного струму з послідовною обмоткою збудження обов'язковим є врахування залежності коефіцієнту магнітного потоку від струму двигуна. Це можна зробити завдяки експериментально знятій характеристиці $k\Phi(i)$.

Залежність $k\Phi = f(I)$ називається кривою намагнічування. За звичай вона задається в графічному виді. Однак в двигунах послідовного збудження магніторушійна сила, як наслідок, і магнітний потік змінюється з зміною струму якоря.

По причині відсутності задовільного математичного опису кривої намагнічування електромагнітних процесів у двигуні постійного струму послідовного збудження являється складним, тому застосовують різноманітні засоби апроксимації кривої намагнічення.

Для цієї мети використовуються вирази, що містять одну із простих функцій, таких як логарифм, експонента, гіперболічні функції або їх комбінації. [3,4].

Для аналітичного представлення використовуються такі функції: $k\Phi = \frac{I}{p_1 + p_2 \cdot I}$;

$$k\Phi = \frac{\arcsin\left(\frac{I}{p_1}\right)}{p_2};$$

$$k\Phi = p_1 \cdot \sqrt{p_2 \cdot I}.$$

Отримані значення зрівнюються з кривою намагнічування отриманої на експериментальній установці (рис. 1).

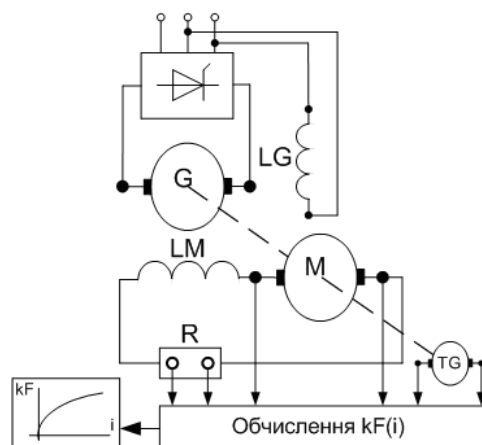


Рис. 1. Установка для зняття кривих намагнічення

Графіки кривих намагнічення, отриманих за допомогою аналітичних виразів, і зняту експериментальним шляхом зображені на рис. 2.

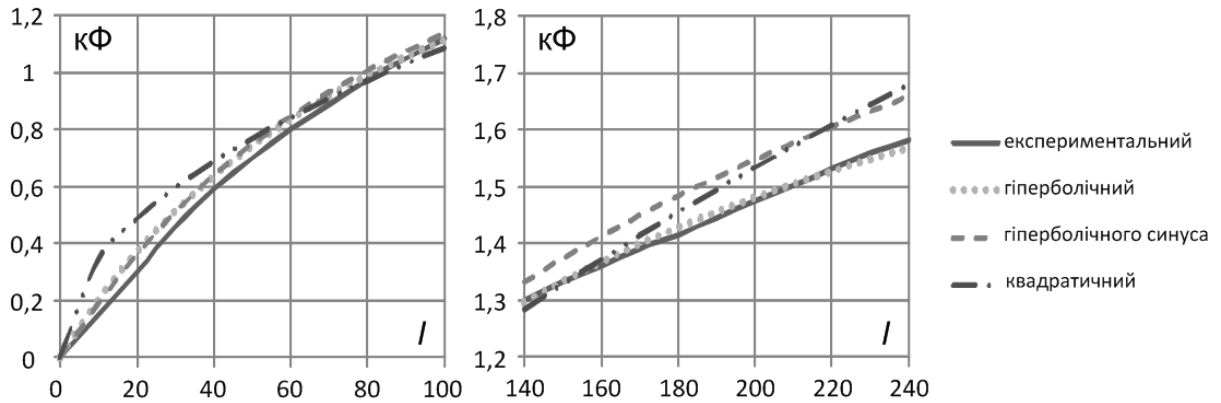
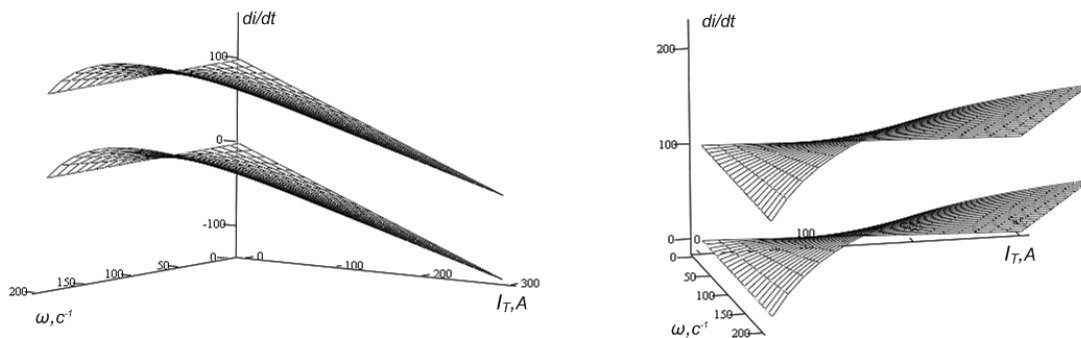
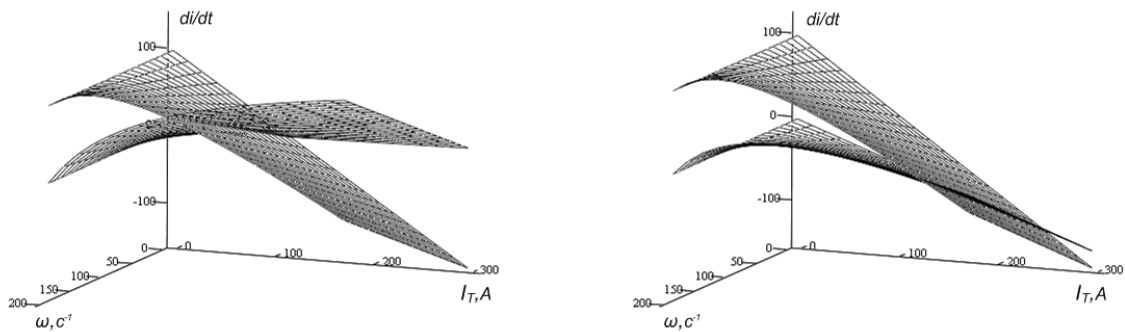


Рис.2. Графіки кривих намагнічування

Тоді за виразами (2) та (3) будемо поперхні залежності швидкості протікання електромагнітних процесів у двигуні від струму гальмування при різних значеннях швидкості обертання та додатковому опорі у колі якоря двигунів.

Рис. 3. Графіки $di/dt=f(i)$ при різних значеннях швидкості обертання та додатковому опорі у колі якоря.Рис. 4. Графіки $di/dt=f(i)$ при різних значеннях швидкості обертання та додатковому опорі у колі якоря.

Висновки та напрямки подальших досліджень. З аналізу графіків кривої намагнічення видно, що в зоні низьких швидкостей найбільш близьким є вираз гіперболічного синуса, а в зоні насичення гіперболічний. Аналіз отриманих кривих (рис. 3,4) показує що траєкторії протікання електромагнітних процесів в режимах противмикання та динамічного гальмування суттєво різняться при неузгодженості параметрів системи гальмування. Таким чином часте перемикавання з одного режиму електричного гальмування на інший буде супроводжуватись значними кидками струму двигунів, що не є бажаним та суттєво погіршує стан ізоляції обмоток двигуна, чим знижує його ресурс роботи та надійність електричного гальмування, від чого в значній мірі залежить ефективність роботи рудничного електровозу. Очевидним, також, є підвищений рівень пульсацій струму двигуна у такому режимі. Тому при імпульсному регулюванні тягових двигунів гальмування з чергуванням режимів противмикання та динамічного гальмуван-

ня, при використанні стандартних тягових агрегатів, не є прийнятним, і потребує схемних рішень щодо доцільності їх відокремлення.

Отримані результати визначають основні вимоги до системи гальмування транспортної засоби, реалізація яких неможлива без розробки чіткого алгоритму функціонування таких систем. Подальші дослідження повинні бути направлені на розроблення такого алгоритму, який буде відповідати визначеним вимогам.

Список літератури

1. **Волотковский С.А.** Рудничная электровозная тяга. - М.: Недра, 1981. - 389с.
2. **Пироженов В.Х.** Рудничные электровозы с тиристорным приводом. - К.: Техніка, 1981. - 159 с.
3. **Городецкий П.Г.** Обзор аналитических выражений кривых намагничивания и гистерезисных петель. – Киев: Воениздат.
4. **Михайлов С.П., Литвинцев А.А.** Аппроксимация экспериментальных кривых намагничивания с помощью рациональных функций. – Дефектоскопия, 1995, № 6.
5. **Синчук О.Н.** Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко, А.А. Чернышов, О.А. Удовенко, О.В. Пасько, Э.С. Гузов. Научное издание. – Київ: ІЕДНАУ, 2006. – 252с.
6. **Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н.** Подвижной состав электрифицированных железных дорог. - М.; Транспорт, 1980. - 471 с.
7. **Зеленов А.Б.** Теория электропривода. Часть 1. Алчевск: ИПЦ «Ладо», ДонГТУ, 2005.
8. **Алексеев Н.И.** Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. – 252.

Рукопис подано до редакції 22.04.16

УДК 621.316.925:622.82

Д.О. КАЛЬМУС, асистент, М.М. ГРАЧОВ, магістрант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ГРАНИЧНИХ УМОВ ЕФЕКТИВНОГО ПЕРЕХОДУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОВІЗІВ З РЕЖИМУ ТЯГИ У РЕЖИМ ГАЛЬМУВАННЯ

Важливою складовою для побудови надійної системи керування електроприводом рудничного електровозу є визначення граничних умов переходу електроприводу із режиму тяги в режим динамічного гальмування. Особливо несприятливо на роботі імпульсних систем управління позначаються зниження і спотворення напруги на струмознімачах електроприводу, що істотно знижує надійність та ефективність гальмування тягового електроприводу і може служити причиною втрати керованості. Існують різні методи вирішення цієї задачі, але методи, ґрунтовані на використування накопиченої енергії у конденсаторі вхідного фільтру отримали найбільше поширення. Метою цієї роботи є дослідження електромагнітних процесів у тяговому двигуні рудничного електровозу при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування. Проведено аналіз електромагнітних процесів у тягових двигунах при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування. З аналізу була встановлена залежність, що дозволяє зробити оцінку граничних умов переходу з режиму тяги у режим гальмування в залежності від ряду факторів, які враховують конструктивні особливості системи електроприводу та початкові умови у колі гальмування.

Ключові слова: тяговий, електровоз, електропривод, гальмування, протипривідження

Проблема та її зв'язок з практичними завданнями. В процесі руху рудничного електровоза напруга на його струмознімачах може змінюватись в широких межах відносно номінального значення. Виникаючі під час цього, так звані, зникнення і зниження напруги живлення можуть служити причиною неможливості переведення електроприводу в гальмівний режим, а також причиною втрати керованості, що істотно знижує надійність і ефективність гальмування тягового електроприводу.

Тому, для побудови надійної системи керування електроприводом рудничного електровозу, важливою складовою є визначення граничних умов можливості переходу роботи електроприводу із режиму тяги в режим динамічного гальмування.

Аналіз досліджень та публікацій. На практиці, для вирішення цієї задачі застосовують різні методи. Найбільше поширення отримали методи, які базуються на використуванні енер-