

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.** Подвижный 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 ЕЛЕКТРОВОЗІВ 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-

гії, що накопичується у конденсаторі вхідного фільтру, або використовують можливості системи керування.

Дійсно, в імпульсних СК тяговим приводом транспортних засобів, які живляться від контактної мережі, цілком резонно, в періоди можливих порушень нормальних умов струмознімання, використовувати для живлення ланцюгів заряд, що накопичується в конденсаторах вхідних фільтрів, що застосовуються для згладжування пульсацій змінної складової струму мережі. ТД в цьому випадку необхідно переводити в режим вільного вибігу.

У міру зниження напруги на обкладках конденсатора від початкового рівня до якогось критичного рівня, нижче якого окремі вузли СК втрачають працездатність, забезпечується безвідмовне функціонування електроприводу.

Час, протягом якого система управління працює за рахунок енергії, запасеної конденсатором, при зниженні напруги на ньому до критичного рівня, має вибиратися з умов забезпечення працездатності СК при зникненні напруги на струмознімачі, що виникають при проїздах ізоляторів, а так само інших короточасних порушеннях контакту "струмознімач - контактна мережа", та може досягати декількох секунд.

Постановка завдання. Провести дослідження електромагнітних процесів у ТД рудникового електровозу при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування.

Викладення матеріалу та результати. Під час зникнення напруги, що підводиться до струмоприймача електроприводу, живлення системи управління і прискорення процесу самозбудження ТД при переході його в режим електродинамічного гальмування відбувається за рахунок енергії збереженої конденсатором вхідного фільтра C_ϕ .

Найбільш важкі умови переходу до гальмування утворюються при низькій швидкості обертання ТД, коли е.р.с. якоря менше рівня $U_{2нрцф}$. Створення початкового гальмівного струму в обмотці LM відбувається в короткий відрізок часу (час перемикання силових контакторів, рівний кілька сотих секунди). При цьому, під час провідного стану IP конденсатор C_ϕ розряджається на активний опір обмотки LM. Зміна напруги на конденсаторі C_ϕ і струму в обмотці LM відбувається відповідно з рівняннями

$$L_{LM} \frac{di_{LM}}{dt} + i_{LM} R_{LM} + U_{c\phi} = 0. \quad (1)$$

$$i_{LM} = C_\phi \frac{dU_{c\phi}}{dt}. \quad (2)$$

Після ряду перетворень спільне рішення рівняння (1), (2) і з урахуванням (2), $i_{LM}(t)$ дорівнюватиме

$$i_{LM}(t) = C_\phi (p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}) \quad (3)$$

де p_1, p_2 - коріння характеристичного рівняння

$$p^2 + 2\delta_1 p + w_2^2 = 0 \quad (4)$$

Стосовно до параметрів контуру L_{LM}, R_{LM}, C_ϕ коли $R_{LM} < 2\sqrt{\frac{L_{LM}}{C_\phi}}$ являють пару комплексних спряжених чисел: $p_{1,2} = \delta \pm jw_3$, де w_3 - частота власних згасаючих коливань

$$w_3 = \sqrt{w_2^2 - \delta^2} \quad (5)$$

При будь-яких заданих початкових умовах функція повинна бути речовинною функцією часу, отже

$$U_c(t) = U_o e^{-\delta t} \cos(w_3 t + \Psi), \quad (6)$$

де U_o - амплітуда гармонійних коливань; Ψ - початкова фаза гармонійного коливання.

Як видно з виразу 6, напруга на конденсаторі описується добутком косинусоїдальної і експоненційної функцією, тобто має характер вільних згасаючих коливань.

Струм, що протікає в розглянутому контурі можна визначити з виразу

$$i(t) = C_\phi U_o e^{-\delta t} (\delta \cos(w_3 t + \Psi) + w_3 \sin(w_3 t + \Psi)) \quad (7)$$

Таким чином, під час привідного стану ІР, конденсатор C_ϕ розряджається на активний опір обмотки збудження і створює в ній струм який змінюється відповідно до вираження (7).

Після виключення ІР ланцюг обмотки LM шунтується зворотнім діодом VD1. Запасена індуктивністю LM енергія гаситься в активному опорі обмотки збудження R_{LM} . Струм в контурі $L_{LM} - R_{LM} - VD1$ може бути визначений з рівняння

$$L_{LM} \frac{di_{LM}}{dt} + i_{LM} R_{LM} = 0 \quad (8)$$

Беручи початкове значення струму рівним I_o , тобто кінцевому значенню струму в обмотці збудження під час провідного стану, рішення рівняння (8) запишемо у вигляді

$$i_{LM}(t) = I_o e^{-\frac{R_{LM}}{L_{LM}} t} \quad (9)$$

На окремих відрізках часу імпульсного циклу значення струму в обмотці LM і напруги легко визначається за допомогою аналітичних виразів (6), (7), (9).

Для того щоб проаналізувати час розряду t_{p2} конденсатора C_ϕ до рівня U_{2np} при різних значеннях його ємності, початкового рівня напруги, частоти і шпаруватості регулювання, необхідно виробляти послідовність розрахунків для кожного імпульсного циклу, так як кінцеві значення напруги в конденсаторі C_ϕ і струму в LM одного стану ІР є початковим для іншого.

При цьому необхідно враховувати, що для забезпечення безаварійного переключення електроприводу в гальмівній режим має виконуватися умова

$$t_{p2} \geq t_{nck}, \quad (10)$$

де t_{nck} - час перемикання силових контакторів ходу і гальмування.

В іншому випадку, коли не виконується умова (10), відбувається повний розряд конденсатора C_ϕ і зниження струму в LM . Тоді, якщо швидкість обертання ТД $\omega_D < \omega_{кр1}$ і струм в обмотці LM $i_{LM} < 0,05I_n$, після завершення перемикання контакторів електродинамічне гальмування не настає, а при $\omega_D < \omega_{кр1}$ виникає струм понад номінального значення.

Перш ніж здійснити пошуки оптимальних значень факторів, що впливають на час розряду конденсатора C_ϕ до граничного рівня U_2 початковим струмом збудження, визначимо межі варіювання цих факторів.

Оскільки створення ініціюючого гальмівного струму відбувається на початку імпульсного регулювання процесу гальмування, робоча частота ІР f_{ip} починає змінюватися в функції змінної складової струму від мінімального заданого значення в сторону збільшення. Оскільки зворотний зв'язок по змінній складовій струму ТД береться за середнім значенням, можна прийняти, що f_{ip} за час створення ініціюючого гальмівного струму постійна і дорівнює мінімальному початковому значенню.

Стосовно до розглянутих умов створення в обмотці LM початкового гальмівного струму, важливим є спосіб регулювання ІР. Причому, необхідно враховувати, що для даного випадку доцільно стабілізувати струм збудження, забезпечив тим самим економічні витрати енергії накопиченої в конденсаторі C_ϕ .

Жорстку стабілізацію струму можна здійснити при регулюванні струму за заданими рівнями або при обмеженні верхнього рівня його пульсацій $I_{0ГР}$. Останній спосіб регулювання більш простий при реалізації. При цьому мінімально допустиме значення верхнього рівня пульсацій ініціюючого струму в обмотці LM вибирається виходячи з того, що значення нижнього рівня його пульсацій не повинно бути менше граничного значення $I_{кр1}$. Якщо ж ця умова не виконується, то при закінченні переходу схеми в режим гальмування, в момент закінчення імпульсного циклу, при $\omega_D < \omega_{кр1}$ гальмування не настає.

Розрахунок величини пульсація відбувається в результаті рішення (6), (7), (8). За час t_1 (рис. 1) струм i_{LM} наростає відповідно до рівняння (7), для якого початкові умови отримані при спільному вирішенні з (6)

$$U_o = \sqrt{\frac{I_{кр\min}^2 + C_\phi^2 \omega_3^2 U_1^2}{C_\phi^2 \omega_3^2}}; \quad (11)$$

$$\Psi_1 = \arccos \frac{U_1}{U_o}.$$

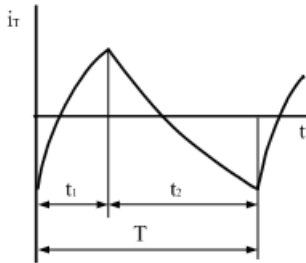


Рис. 1. Діаграма змінної складової гальмівного струму: T – період; t_1 – час провідного стану імпульсного регулятора; t_2 – час закритого стану імпульсного регулятора

Підставивши в (9) $I_{озг}$ отримаємо нерівність

$$I_{озг} \geq I_{кр\min} e^{\frac{K_{LM}}{I_{LM}} t_2} \quad (12)$$

де $t_2 = T - t_1$, див. рис. 1.

Якщо врахувати, що перехід до гальмування ТД може відбуватися при $\omega_\theta < \omega_{кр1}$ і максимальних значеннях $U_{сф}$, тоді

$$\frac{di_{LM}}{dt} \rightarrow \max, t_1 \rightarrow 0, t_2 \rightarrow T.$$

Підставивши в (12) значення періоду, виражене через частоту, отримаємо

$$I_{озг} \geq I_{кр\min} e^{\frac{K_{LM}}{f_{ip} L_{LM}}} \quad (13)$$

або

$$I_{озг} \geq K I_n e^{\frac{K_{LM}}{f_{ip} L_{LM}}} \quad (14)$$

де $K = 0,05 \div 0,13$.

Максимально допустиме значення $I_{озг}$ визначається з розрахунку, що середнє значення струму не повинно перевищувати $0,75 I_n$. Остаточні межі допустимих значень $I_{озг}$ обмежуються нерівністю

$$K I_n e^{\frac{K_{LM}}{f_{ip} L_{LM}}} \leq I_{озг} \leq 0,75 I_n + \frac{\Delta I}{2} \quad (15)$$

Стосовно до конкретних параметрів тягового електроприводу, час розряду t_{p2} конденсатора C_ϕ до напруги $U_{2нрсф}$ відбувається в період ініціації гальмівного режиму, залежить від початкової напруги $U_{2н}$ на конденсаторі C_ϕ , його ємності, комутованого струму i_k , робочої частоти f_{ip} перетворювача. Причому для забезпечення безаварійного переключу електропривода в гальмівній режим має виконуватися умова (10).

Як було вище зазначено, за час створення ініціюючого струму в обмотці LM зміна f_{ip} незначна, тому приймаємо $f_{ip} = const$ і дорівнює початковому значенню.

Таким чином, отримані математичні вирази для визначення параметрів системи при початковому збудженні ТД в режимі гальмування зарядом конденсатора вхідного фільтра, що дозволить оцінити тривалість часу ефективного регулювання струму збудження, в залежності від ємності конденсатора, комутованого струму збудження, початкової напруги на конденсаторі.

Висновки та напрямки подальших досліджень. З аналізу електромагнітних процесів у ТД рудникових електроприводів при переході системи електроприводу з режиму тяги у режим гальмування 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.

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: ІЕДНАНУ, 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. **Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.
- Рукопис подано до редакції 16.04.16

УДК 621.316.14

А.Г. ЛИКАРЕНКО, канд.техн.наук, доц., А.А. ПЕТРИЧЕНКО, ассистент,
Р.В. ЗИМАНКОВ, аспирант, Криворожский национальный университет

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ КРИВБАССА В НЫНЕШНИХ УСЛОВИЯХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье приведены результаты исследований состояния изоляции распределительных сетей шахт Криворожского железорудного бассейна. Анализ параметров изоляции сетей железорудных шахт является важным этапом для повышения эффективности функционирования существующих и разработки новых аппаратов защиты от утечек тока, задача которых осуществлять безопасность горнорабочих при эксплуатации электротехнических комплексов в подземных горных выработках. Эффективная и стабильная работа аппаратов защиты от утечек определяется правильностью измерения активного сопротивления и емкости изоляции сети, т.е. косвенного определения токов утечки, дальнейшей компенсации емкостных токов утечки и обеспечения достаточно быстрого отключения сети при повреждении изоляции или прикосновении человека. Проведен анализ и статистическая оценка электрических параметров изоляции сетей железорудных шахт. Полученные результаты рекомендуется принимать в качестве исходных данных при разработке эксплуатационно-технических требований к устройствам защитного отключения в распределительных сетях железорудных шахт.

Ключевые слова: железорудные шахты, распределительная сеть, ток утечки, аппарат защиты от утечек

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. Необходимость проведения экспериментальных исследований по установлению диапазонов изменения параметров изоляции рудничных распределительных сетей относительно земли существовала уже давно и обусловлена тем, что на шахтах Кривбасса такие полноценные исследования проводились лишь в период 1978-1980 гг. [2]. Поэтому результаты этих исследований сегодня не отражают фактическое состояние изоляции нынешних электрических сетей. Это связано с тем, что за истекшее с того момента время произошли существенные изменения как в схемах электроснабжения горных участков, так и в применении другого электрооборудования (регулируемого электропривода), кабельной продукции, коммутационной и защитной аппаратуре.

Изложение материала и результаты. Экспериментальные исследования были произведены на следующих объектах: ш. Гвардейская, ш. Октябрьская, ш. Родина, ш. Ленина (ПАО «КЖРК»), а также на ш. Артем-1 и ш. Артем-2. При этом следует отметить, что горногеологические и горнотехнические условия месторождений примерно одинаковы почти для всех шахт Кривбасса, что позволяет предположить, что результаты исследований по ряду шахт можно распространить и на остальные шахты Криворожского бассейна.

Измерение электрических параметров изоляции сетей относительно земли производились методом КГРИ [3].