

$$\omega_n = \frac{U_{d0n} \cdot \gamma_n - I_{dn} \cdot R_{en}}{k\Phi_n \cdot \text{sign}(k\Phi_n)} \quad (2)$$

де ω_n - швидкість обертання n -го двигуна; γ_n - шпаруватість n -го ШПП; R_{en} - еквівалентний опір якірного кола структури «перетворювач-двигун».

Вартість зазначених технічних рішень формується переважно вартістю силових ключів. При використанні IGBT транзисторів сумарна вартість технічного рішення становитиме ≈ 728 тис. грн. (Price_{ГТО} на рис. 4).

Таким чином, прогнозований термін окупності дорівнює 2.5 місяців.

Висновки та напрямки подальших досліджень. В роботі доведена актуальність застосування методів енергозаощадження до об'єктів металургійної промисловості. Проаналізовано потенціал енергоефективності прокатного виробництва на прикладі стану НЗС 900/700/500 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

В ході грубої оцінки показано, що повна компенсація реактивної потужності в системі живлення дозволить отримати економічний ефект 3.497 млн. грн. в рік.

Також показано, що зазначений економічний ефект перевищує економічний ефект від компенсації активних втрат в мережі більше ніж у 2 рази.

Виходячи із попередніх висновків запропоновано найбільш доцільний напрямок модернізації системи живлення з терміном окупності 2.5 місяців.

Список літератури

1. Річний звіт НЕК «Укренерго». – Режим доступу до журн.: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/>
2. Karandaev A.S. Improving electric power quality within the power supply system of wide-strip hot-rolling mill stand / A.S. Karandaev, G.P. Kornilov, V.R. Khramshin // International Conference on Industrial Engineering, Procedia Engineering. - 2015. - №129. – P.2–8.
3. Ardura P. Power Quality Analysis and Improvements in a Hot Rolling Mill using a STATCOM / Ardura P., Gonzalez A., Jose M. Cano [and other] // International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14). – April 2014. - No.12. -ISSN 2172-038.
4. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.

Рукопис подано до редакції 05.03.16

УДК 621.316.925:622.82

В.В. ОНИЩЕНКО, магістрант, Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОЛИВАНЬ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИВОДА РУДНИКОВОГО ЕЛЕКТРОВОЗА

При роботі рудникових електровозів можливі відхилення напруги живлення від номінального значення, в зв'язку з чим, при виконанні певних умов, можуть відбуватися зриви комутацій в тиристорному перетворювачі, що знижують ефективність електричного гальмування. В даний час є ряд рішень, спрямованих на забезпечення безаварійного функціонування електроприводу в умовах знижень і зникнень напруги живлення. Це установка на електровозах спеціальних генераторів напруги, гальмування тягових двигунів при порушенні нормального режиму живлення, застосування контактно-акумуляторних електровозів. І все ж, відмічені шляхи вирішення цього завдання не є достатньо ефективними, тому що для досягнення поставленої мети вимагають застосування додаткового електрообладнання, що в деяких випадках ведуть до зниження продуктивності електровозної відкатки. На важких рудникових електровозах (величиною зчійної ваги менше 28 тонн), а також середнього і легкого типу відсутній вільний простір для розміщення додаткового електрообладнання. Це викликає необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності функціонування систем управління рудникових електровозів, розробки нових прогресивних засобів управління, розроблених на використанні енергії накопичувальних конденсаторів вхідних фільтрів, енергії обертових електричних машин (наприклад, в даному випадку енергії обертових ТД). Такий напрямок вирішення питання є достатньо економічним, так як не потребує використання додаткового силового обладнання, збільшення пов'язаних з цим експлуатаційних затрат.

Ключові слова: рудниковий електровоз, напруга живлення, комутація, контактно-акумуляторний електровоз, конденсатор вхідного фільтру, генератор

Проблема та її зв'язок з практичними завданнями. Стосовно до умов електропостачання рудничної електровозної відкатки, можливі значні відхилення рівня живлячої напруги від номінального значення. Особливо несприятливо на роботі імпульсних систем управління РЕ позначаються зниження і спотворення напруги на струмознімачах електроприводу. При цьому, деякий час, апаратура системи управління живиться за рахунок енергії заряду конденсатора вхідного фільтра. Однак, тривале зникнення напруги живлення призводить до втрати управління електроприводом, виключаючи тим самим можливість переведу двигунів в режим гальмування, а в разі необхідності екстреного гальмування можуть привести до аварійної ситуації.

Аналіз досліджень та публікацій. Порівняльний аналіз основних відомих схем електричного гальмування ТД рудникових електровозів показує, що основними причинами зниження рівня напруги на конденсаторі є відключення напруги живлення на підстанції; посадка напруги в результаті зосередження навантаження на окремих секціях контактної мережі; порушення контакту між струмознімачем електропривода і контактним проводом мережі живлення.

Аналіз можливих причин зниження рівня живлячої напруги на конденсаторі вхідного фільтра електроприводу рудникових електровозів висуває завдання подальшого розширення і поглиблення досліджень, спрямованих на покращення ефективності функціонування приводу рудникових електровозів. У цьому випадку питання підвищення ефективності функціонування електричного приводу доцільно вирішувати за допомогою автоматизації процесів керування електроприводом рудникових електровозів.

Дійсно, звести до мінімуму негативний ефект від провалів напруги живлення на струмознімачах рудникових електровозів можна шляхом вдосконалення, а також розробки нових способів управління, розроблених на використанні енергії накопичувальних конденсаторів вхідних фільтрів, енергії обертових електричних машин (наприклад, в даному випадку енергії обертання ТД). Такий напрямок вирішення питання є достатньо економічним, так як не потребує використання додаткового силового обладнання, збільшення пов'язаних з цим експлуатаційних затрат.

Постановка завдання. Провести аналіз можливих причин зниження рівня напруги живлення контактної рудникового електровозу. Встановити фактори, що впливають на роботу електроприводу в режимі тяги та гальмування. Запропонувати рішення щодо зменшення впливу коливань напруги живлення на працездатність системи електропривода.

Викладення матеріалу та результати. Зменшення ефективності будь-якої системи зазвичай вимірюється функцією досяжності максимального значення в "ідеальних" умовах (відсутність відмов, перешкод, збоїв і т.ін.). При цьому прийнятна повноцінність функціонування системи забезпечується виконанням закладених в її функціональну схему заданої кількості властивостей, які визначаються накладеними вимогами експлуатації, безпеки і т.п.

Так, для прискорення процесу збудження двигунів і розширення діапазону швидкостей, при якому забезпечується їх надійне гальмування, в силовому ланцюзі електроприводу необхідний початковий гальмівний струм. При цьому витрати часу для переведу двигунів в режим гальмування зводяться до мінімуму і стають порівнянними з часом спрацьовування контакторів гальмівного режиму.

Робота контактних рудникових електровозів пов'язана з частими зниженнями і зникненнями напруги живлення на струмознімачах електроприводу. Останнє накладає вимоги реалізації надійного гальмування ТД незалежно від знижень рівня напруги на конденсаторі вхідного фільтра до якогось критичного значення, нижче якого елементна база системи управління втрачає свою працездатність. Після зникнення напруги живлення на струмознімачах рудникових електровозів протягом деякого часу (кілька секунд), установлений на вході системи імпульсного регулювання конденсатор вхідного фільтра працює в якості джерела живлення зі змінною напругою. Якщо при цьому відбувається перемикання схеми електроприводу в режим гальмування, не виключена можливість втрати керованості IP, що, безсумнівно, веде до зниження ефективності гальмування ТД.

У практиці автоматизації процесів управління електропривода рудникових електровозів досить часто зустрічаються завдання, в яких на стан системи і на значення критерію помітний вплив чинять випадкові чинники. В цьому випадку керований процес не повністю визначається початковим станом системи і вираженим управлінням, а в якійсь мірі залежить від випадку. Такі завдання, до яких можна віднести і приведену вище, називаються стохастичними.

Для знаходження оптимального рішення стохастичних задач використовуються багатоетапні методи. При цьому вектор стану системи визначається різноманіттям незалежних факторів, що впливають. В донному випадку визначаючим вектором вхідних змінних є

$$\bar{V} = (\omega_{\delta}, U_{cf}, i_3),$$

де U_{cf} - напруга на конденсаторі C_{cf} електроприводу РЕ з ІР; i_3 - початковий струм збудження.

Перш ніж прийняти рішення про вибір раціонального критерію ефективності функціонування системи, необхідно проаналізувати стан вектора вхідних обурюючих впливів і відгуку системи на деякому етапі N та вибрати допущення, необхідні для побудови математичної моделі [2-4].

Отже, маючи вектор вхідних незалежних змінних \bar{V} , необхідно відзначити, що параметр i_E є неявно вираженою функцією від змінних

$$i_3 = F(U_{cf}, C),$$

де C - стан імпульсного регулювання ІР, при цьому мається на увазі його нормальне функціонування і виникнення аварійних режимів (тобто зривів комутацій в ІР).

У свою чергу C є неявно вираженою функцією від змінних

$$C = F(U_{cf}, i_3, \Pi),$$

де Π - принципи і методи регулювання ІР і т.п.

Для вибору критерію ефективності надійного функціонування приводу рудникових електровозів в режимі гальмування Ег, в загальному випадку необхідно враховувати вище розглянуті впливаючі фактори, тобто

$$E_{\Gamma} = F(\omega_{\delta}, U_{cf}, i_3, C).$$

Найбільші труднощі при здійсненні гальмування контактних РЕ виникають при низькій частоті обертання ТД і відсутності напруги на струмознімачах U_{π} . В даний час відомий ряд шляхів рішення вище поставленого завдання. Проте існуючі системи гальмування тягового приводу рудникових електровозів з ІР, не в повній мірі задовольняють вимоги накладені специфікою рудничної електровозної відкатки.

Так, наприклад, рішенням багатьох питань по автоматизації процесів управління, та забезпечення безпеки руху, підвищення ефективності та надійності може бути встановлення згладжуючих дроселів, автономних джерел живлення оперативних ланцюгів системи (акумуляторів, спеціальних генераторів напруги) і т.ін.

Однак, ця задача ускладнена відсутністю вільного простору для розміщення додаткового електроустаткування.

Це викликає необхідність пошуку інших шляхів підвищення ефективності функціонування систем управління рудникових електровозів, та зводиться до розробки нових прогресивних засобів управління.

Тому, в подальшому слід враховувати, що підвищення ефективності функціонування приводу рудникових електровозів в режимі гальмування не повинно супроводжуватися значним збільшенням габаритів системи, а також переводу ТД в режим гальмування і сам процес гальмування повинен здійснюватися з мінімальними витратами часу.

При цьому загальний критерій з урахуванням необхідних обмежень може бути писаний як

$$E_{\Gamma} = \sum F(\bar{V}_i), \text{ при } t_{III}, t_{\Gamma}, \Gamma \rightarrow \min,$$

де $t_{III}, t_{\Gamma}, \Gamma \rightarrow \min$ - час перекладу ТД в режим гальмування; Γ - час гальмування ТД.

Γ - габарити системи, тобто за допомогою варіювання складових вектора \bar{V}_i йде аналіз поведінки системи і оцінюється ступінь зниження (підвищення) ефективності досліджуемого процесу. Надалі виробляється стратегія поведінки системи, забезпечуючи її безвідмовне функціонування з урахуванням вище накладених обмежень.

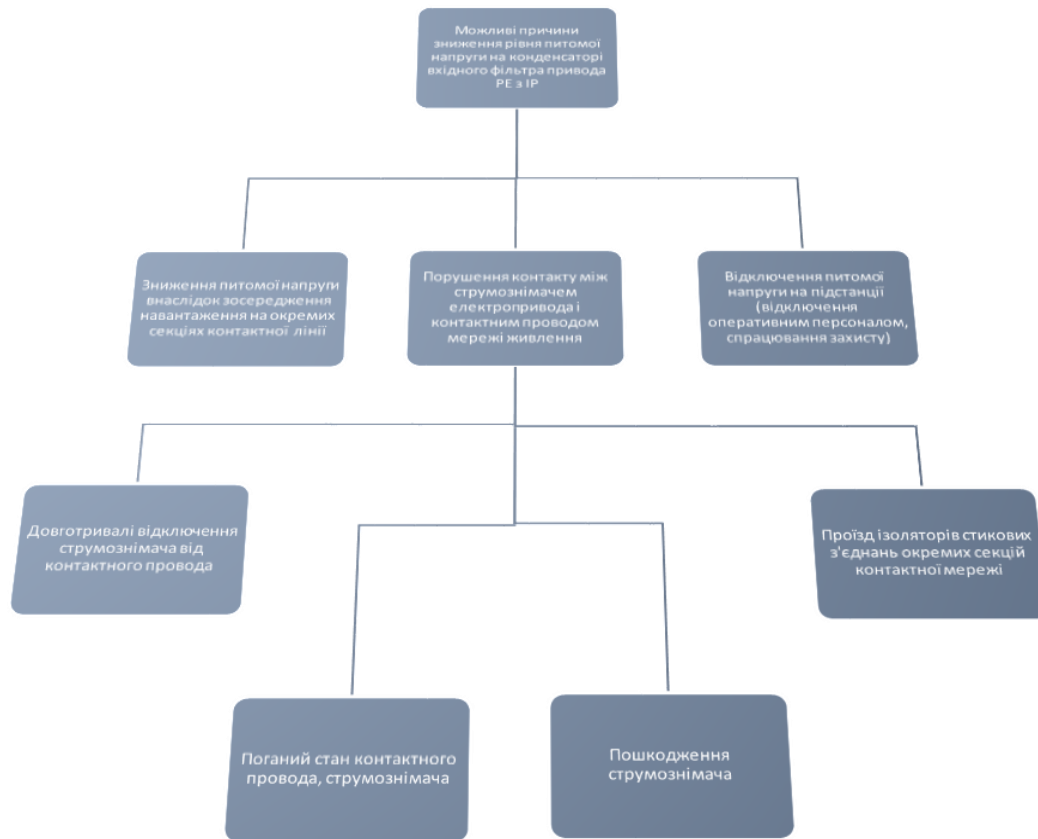


Рис.1. Причини можливого зниження рівня напруги живлення

Як вже зазначалось, в силу ряду причин (рис. 1), електричний опір між контактним дротом і струмознімачем в процесі руху рудникового електровозу може змінюватися випадковим чином від мінімального до нескінченно великих величин.

На практиці повністю усунути це негативне явище не представляється можливим.

Тут мається на увазі, що в будь-якому випадку не виключається можливість наявності однієї або декількох причин зниження рівня напруги живлення.

Під час тривалих відривів струмознімача від контактної лінії, енергії конденсатора, після зниження напруги на ньому до другого контрольованого рівня, має бути достатньо для створення ініціюючого струму, що забезпечує надійне самозбудження двигуна при перекладі його в режим електродинамічного гальмування.

Крім того, так як напруга на конденсаторі залежить від напруги на конденсаторі і від комутуючого ініціюючого струму, що зменшується, напруга на конденсаторі комутуючого не повинно знизитися до граничного значення, при якому конденсатор не може зарядитися до напруги, що забезпечує надійну комутацію ініціюючого струму.

При цьому є очевидним, що мінімально допустима напруга накопичувального конденсатора фільтра, що згладжує за умови створення ініціюючого струму, повинно мати запас, що буде забезпечувати роботу електроприводу з початковим збудженням ТД в режимі електродинамічного гальмування.

У разі невиконання цієї умови, має формуватися керуючий вплив, що забезпечує умови безаварійного функціонування системи електроприводу рудникових електровозів.

Висновки та напрямки подальших досліджень. З проведеного аналізу можливих причин зниження рівня напруги живлення контактної лінії рудникового електровозу встановлено, що найбільш впливовими факторами, що впливають на роботу електроприводу в режимі тяги та гальмування є порушення контакту між струмоприймачем та дротом мережі живлення під час виконання гальмування електровозу та початкова швидкість гальмування.

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