

УДК 622.625.28

І.О. СІНЧУК, канд. техн. наук, Д.О. КАЛЬМУС, ст. викладач
Криворізький національний університет

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ФАКТОРІВ ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ КОНТАКТНОГО ЕЛЕКТРОВОЗУ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Мета. Метою даної роботи є дослідження особливостей роботи тягового електромеханічного комплексу контактної електровазони в умовах залізрудних шахт та виявлення факторів, які найбільш впливають на ефективність транспортування гірської породи, для конкретних умов відкочування.

Методи дослідження. При проведенні розглянутого в статті дослідження було використано методи безпосереднього спостереження та вивчення режимів роботи та графіків навантаження електроприводів та загальна теорія навантажень електроприймачів із змінним графіком навантаження.

Наукова новизна. Розв'язання даної задачі складає актуальність роботи. Її метою є узагальнення відомих методів розрахунків імпульсних електромеханічних систем і формулювання на цій основі уніфікованого методу з розробкою системи гальмування, що ефективно функціонує до нульової швидкості шахтного електровазони при максимальному використанні гальмівних властивостей тягового електроприводу.

Практична значимість. Отримані результати можна використовувати як розрахунково-аналітичний апарат на етапі ескізного проектування тягового електроприводу при складанні методики розрахунку та розробки схемних рішень системи електричного гальмування шахтного електровазони.

Результати. Вдосконалення теорії комплексного розрахунку систем з імпульсними перетворювачами та врахуванням процесів в системах регулювання й керування, а також специфіки експлуатації дозволить виконувати комплексне проектування систем імпульсного регулювання за критерієм досягнення найкращих показників роботи електровазони, тобто мінімальний шлях гальмування – максимальна зчїпна вага, для заданої технічної швидкості. Можливість виконувати перетворювачі на базі IGBT транзисторів, які можна вважати ідеальними ключовими елементами, які не мають контурів ємнісної комутації, значно полегшує розрахунки зовнішніх і регулювальних характеристик електроприводу та побудову системи керування. Чергове завдання полягає в тому, щоб розробити теорію комплексного розрахунку систем з імпульсними перетворювачами, враховуючи при цьому процеси в системах регулювання й керування, а також врахувати специфічні обмеження електрорухомого складу, наприклад по зчїпленню

Ключові слова: електровазон, двигун, перетворювач, зчїплення, система гальмування.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-46-112-118

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Проблема вдосконалення транспортування (відкочування) руди на залізрудних шахтах здобуває все більше значення. Зі збільшенням глибини розробки скорочуються рудні площі й одночасно збільшується довжина транспортних магістралей. Це обумовлене як погіршенням гірничо-геологічних умов (виклинцюванням покладів) зі зниженням рівня ведення гірських робіт, так і специфікою розкриття залізрудних родовищ – вертикальними стовбурами в лежачому боці покладів. При існуючій інтенсивності розробки зниження гірських робіт становить 18-20 м на рік. Обсяг проведення відкаточних виробіток (штреків, ортів, квершлагів) щорічно збільшується в середньому на 15%. Ці фактори негативно позначаються на показниках роботи відкочування й підприємства в цілому.

Основним видом транспорту на підземних гірських підприємствах є електровазний. Довжина відкаточних виробіток обладнаних електровазним транспортом сягає 80%. На магістральних відкаточних шляхах електровазний транспорт є домінуючим (понад 90%) [1]. Це пояснюється порівняно малою енергоємністю цього виду транспорту, відсутністю забруднення навколишнього середовища, гарною пристосованістю до автоматизації.

Існуючий стан транспорту характеризується низькими техніко-економічними показниками, це обумовлене частим виходом з ладу тягових двигунів, зношуванням бандажів гальмових колінок електровазони.

Аналіз досліджень і публікацій. Як показали результати досліджень, ефективність електровазної відкочування нерозривно пов'язана з удосконаленням системи гальмування шахтних електровазони, оскільки в ряді випадків маса поїзда визначається умовами його гальмування виходячи з максимально припустимої швидкості й довжини шляху гальмування. Досягнення необхідної безпеки руху повинно забезпечуватися високою ефективністю засобів гальмування [1-5].

Основні тенденції щодо реалізація вимог енергоефективності, пронизуючи всі види електроприводів, виглядають особливо актуальними для їхніх тягових варіантів у різних видах електрифікованого транспорту [1-3]. В свою чергу найбільший ефект очікується при впровадженні сучасних технологій та систем керування на базі імпульсних перетворювачів, які можуть бути виконані на силових тиристорах або на транзисторах [7, 10].

Постановка завдання. Дослідження особливостей роботи тягового електромеханічного комплексу контактного електровозу в умовах залізничних шахт та виявлення факторів, які найбільш впливають на ефективність транспортування гірської породи, для конкретних умов відкочування.

Викладення матеріалу і результати. Залежно від гірничотехнічних умов і продуктивності шахти обирається тип і маса електровоза, тип і вантажопідйомність вагонеток і їх кількість – тобто визначається маса поїзда. При цьому враховується опит експлуатації електровозного транспорту на аналогічних підприємствах.

Максимально припустима маса поїзда потім уточнюється для конкретних умов транспортування в шахті за наступними критеріями:

- умовам зчеплення при пуску й русі рухомого складу;
- припустимому нагріванню тягових двигунів;
- припустимій довжині гальмового шляху.

Якщо величина максимально припустимого потягу за умовами зчеплення визначається виходячи з найбільш важкої вимоги – рушення завантаженого поїзда на переважний підйом. При цьому звичайно приймають:

- коефіцієнт зчеплення коліс електровоза з рейками при пуску з підсипанням піску;
- пускове прискорення.

А при визначенні маси поїзда виходячи із забезпечення припустимого гальмового шляху, розв'язок зводиться до визначення гальмових шляхів по заданим швидкостям або, навпаки, визначенню швидкостей по заданим (припустимим) гальмовим шляхам при відомих гальмових засобах поїзда, тобто при відомій гальмовій силі. При цьому енергія, запасена масою, що рухається, перетвориться в процесі гальмування [8].

З умови збереження енергії

$$\frac{mv^2}{2} = Bl,$$

де m – припустима маса потяга, кг; v – швидкість при гальмуванні, м/с; B – гальмова сила, Н; l – гальмовий шлях, м.

Тобто припустима швидкість при заданому гальмовому шляху:

$$v = \sqrt{2Bl/m}.$$

При виконанні розрахунків виходять із найбільш важких умов: гальмування завантаженого рухомого складу на переважному ухилі.

У ряді випадків при тягових розрахунках електровозного відкочування визначають так званий розрахунковий гальмовий шлях, який містить у собі шлях підготовки до гальмування й шлях гальмування. Шлях підготовки до гальмування залежить від часу, необхідного для приведення в дію гальмівної системи (для електровозів К10 і К14 головним чином від часу наповнення повітрям гальмових циліндрів). Час для підготовки до гальмування на основі опиту може бити прийнятий рівним 2с. Можна відзначити, що в основі розв'язку гальмових задач лежить припустимий гальмовий шлях, який встановлюється виходячи з вимог безпечного руху поїздів.

Отже, система гальмування займає важливе місце в структурі електровозів. У цей час невід'ємною частиною систем гальмування рудникових контактних електровозів продовжує залишатися механічне [1, 2]. Однак, як показує аналіз рейсових діаграм роботи тягових електроприводів шахтних електровозів, близько 70% від загального режиму гальмування становить електричне гальмування [2, 3].

Механічне гальмування поїзда, яке здійснюється звичайно за допомогою натискання гальмових колодок на бандажі коліс, веде до більш або менш швидкого зношування тертьових поверхонь. Тому в електровозному відкочуванні бажано застосовувати електровози, що допуска-

ють можливість застосування не тільки механічного, але й електричного гальмування, вільного від зазначеного вище недоліку.

Електровоз 4КР1 являє собою тверду зварену металеву конструкцію із внутрішнім розташуванням колісних пар і центральним розташуванням кабіни машиніста. Привод колісної пари складається з тихохідного двигуна й двоступінчастого циліндрично-конічного редуктора з рознімним кожухом. Рама має безбалансирну підвіску, виконану на восьми індивідуальних циліндричних ресорах, установлених попарно над кожною буксою. Гальмо ручне з чотирьох колодок. Гальмові колодки поміщені із зовнішньої сторони колеса.

Електровози 10КР2 і 14КР2 [4] постачені пневматичним приводом системи гальмування й електричним реостатним гальмуванням. Схема дозволяє робити пуск і їзду при послідовному й паралельному з'єднанні двигунів, електродинамічне (реостатне) гальмування – при паралельному з'єднанні двигунів по перехресно-петлевій схемі. Для переходу від режиму тяги до гальмування, рукоятку реверсивного барабана ставлять на одне з розподілів режиму гальмування («Вперед» або «Назад»), а потім рукоятку головного барабана поступово повертають у напрямку, протилежному напрямку при пуску.

Електровози К10 й К14 [4] оснащені пневмосистемою, яка забезпечує роботу гальмової й піскової систем, дію автозчеплення й пневматичного сигналу, підйом і опускання струмоприймача. Ці електровози обладнані колодковими гальмами з ручним і пневматичним приводами й електродинамічним (реостатним) гальмуванням. Електричне гальмування включається рукояткою головного вала контролера.

Система гальмування електровоза К14 відрізняється від систем гальмування інших шахтних електровозів тим, що тільки одне колесо обладнане ручним приводом колодкового гальма. Основним гальмом на електровозах К10 й К14 є колодкове гальмо із пневматичним приводом. У цьому випадку величина сили натискання гальмових колодок на бандаж колеса здійснюється гальмовим краном, що приводиться в дію педаллю від ноги машиніста електровоза, причому тиск у гальмових циліндрах зростає зі збільшенням ходу педалі.

Як відомо [1, 3], стосовно до електричної тяги найбільш прийнятними є електродинамічне, рекуперативне та гальмування проти вмиканням, а також комбінація цих способів.

Слід зазначити, що гальмування проти вмиканням супроводжується значною витратою електричної енергії й часто приводить до поломок зубчастих передач редуктора. Із цих причин гальмування проти вмиканням не рекомендується [3]. Однак, на практиці нерідко використовується як аварійне.

Застосування рекуперативного гальмування в електричній тязі на постійному струмі зустрічає ряд ускладнень [3]. Так, середня швидкість руху рудникових локомотивів по магістральним виробіткам не перевищує 2 м/с і кінетична енергія, тобто можлива енергія рекуперації, пропорційна квадрату швидкості, виявляється несуттєвою. У місцях завантаження й розвантаження складу ці показники ще нижче [3]. Крім того робота шахтних контактних електровозів характеризується частими відривами струмоприймача від контактної дроти, а порушення контакту між струмоприймачем і контактним дротом веде до зриву процесу рекуперації, порушенню нормального протікання процесу гальмування. До того ж ефективність рекуперативного гальмування багато в чому залежить від наявності на тяговій ділянці споживачів енергії, а також параметрів самої системи електропостачання. Якщо цей вид гальмування досить широко використовується в магістральних електровозах, то в шахтних умовах застосування рекуперації енергії малоефективне, а в більшості випадків взагалі неприйнятне по технічним умовам.

Існуючі тягові двигуни, що встановлені на шахтних електровозах, мають послідовне збудження. Вони мають м'яку швидкісну характеристику, сприятливу для умов електричної тяги. Звичайно, це обумовлює більші величини неузгодженості швидкостей руху, але ця проблема на практиці вирішується застосуванням спеціальних схем включення двигунів, або використанням тягових двигунів з більш твердою швидкісною характеристикою – компаундних, що дозволяє зменшити неузгодженість швидкостей руху [5, 6].

Тому на електровозах, у якості тягових, широке застосування знаходять електричні машини постійного струму послідовного збудження, які дозволяють здійснювати регулювання частоти обертання відносно простими засобами [1]. Цей вид привода зіграв свою вагому позитивну роль у розвитку електрифікованих видів транспорту й покликаний чекаючи заміни на інші, більш енергоефективні, типи функціонувати ще не один десяток років [4-10].

Основним напрямком при розробці систем гальмування шахтних електровозів є створення безконтактних схем керування приводом електровоза для плавної зміни гальмового зусилля. У роботах [8, 10] відзначено, що використання відомих систем для керування режимом електродинамічного гальмування припускає наявність на електровозі додаткових джерел напруги, а також датчиків швидкості (прискорень та струму). У відомих розробках пропонується в якості додаткового джерела живлення схеми гальмування використовувати напругу контактної мережі. Однак, специфічні умови експлуатації шахтних електровозів характеризуються порушенням нормальних умов струмознімання, що знижує ефективність гальмування й рівень безпеки руху.

Як правило, рухомий склад робить від 3-х до 6-ти рейсів у робочу зміну. При цьому машиніст електровоза 90-110 раз здійснює перемикання контролера, що регулює швидкість руху поїзду, а на максимальній позиції контролера він здійснює перемикання до 10 разів і рухається близько 10-12 хвилин, тобто 25% часу повного циклу руху. Кількість відривів пантографа від контактної дроти 70-100 раз, тобто фактично в середньому щохвилини – відрив. При завантаженні рухомого складу в ортах машиніст здійснює 24-30 перемикань контролера для перестановки вагонів.

На рис. 1 представлені фото фіксації максимального (а) та мінімального (б) за часом відривів пантографа електровоза від контактної дроти.

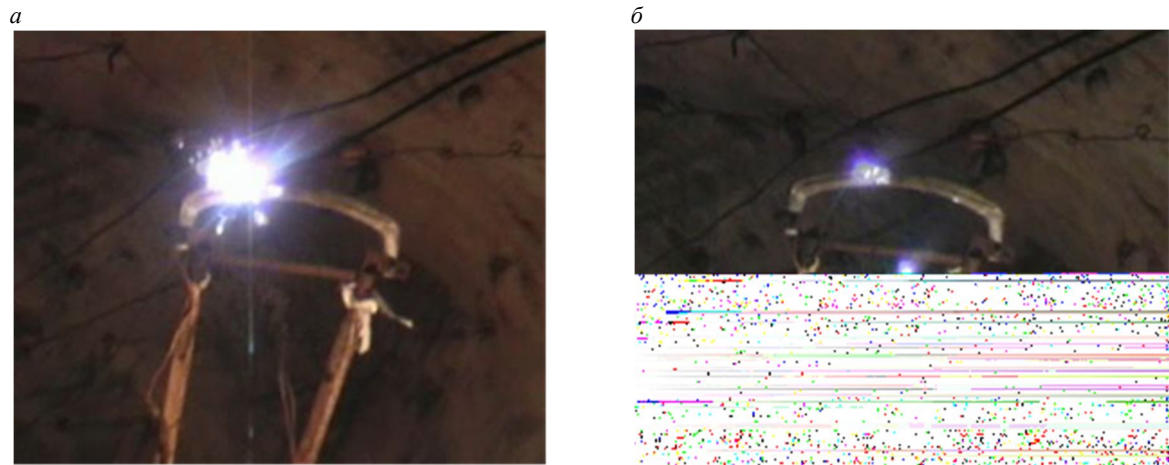


Рис. 1. Фото фіксації максимального (а) та мінімального (б) за часом відривів пантографа електровоза від контактної дроти

Джерело постійної напруги на існуючих електровозах відсутнє і, у випадку зникнення напруги в контактній мережі, виключається можливість живлення схем керування та датчиків. Встановлення акумуляторних батарей, як джерела живлення відомих схем гальмування, нецільна у зв'язку з обмеженими розмірами шахтних електровозів і складністю обслуговування загальнопромислових акумуляторів в підземних умовах.

Застосовувана апаратура керування режимами гальмування не дозволяє здійснити автоматичну зупинку рухомого складу при зникненні напруги в контактній мережі, як при аварійній ситуації, так і при дистанційним управлінні переміщенням поїзда в місцях завантаження й розвантаження.

Ці особливості необхідно враховувати при створенні й визначенні параметрів автоматичного електричного гальмування шахтного електровозу.

При ручнім керуванні машиніст електровозу має можливість реалізувати східчастий режим електродинамічного гальмування за допомогою контролера прямої дії. Вибір моментів перемикання з однієї щаблі гальмування на іншу здійснюється машиністом суб'єктивно. При цьому не враховуються можливі припустимі межі зміни струмових навантажень на кожному щаблі гальмування. Це викликає різні динамічні навантаження на електромеханічне встаткування й веде до необґрунтованого зношування головок рейок й бандажів колісних пар за рахунок роботи привода в зоні надлишкового ковзання.

Отже, існуюче керування не відрізняється надійністю роботи, а часте перемикання режимів роботи призводить до необоротних наслідків, таких як порушення контакту та руйнування елементів електричних схем. самих опорів.

На рис. 2 показано наслідки впливу роботи тягового електроприводу шахтного електровозу в режимах з підвищеним струмом. Тут можна бачити секції гальмівного реостату та електричні з'єднання з наслідками їх локальних перегрівань.

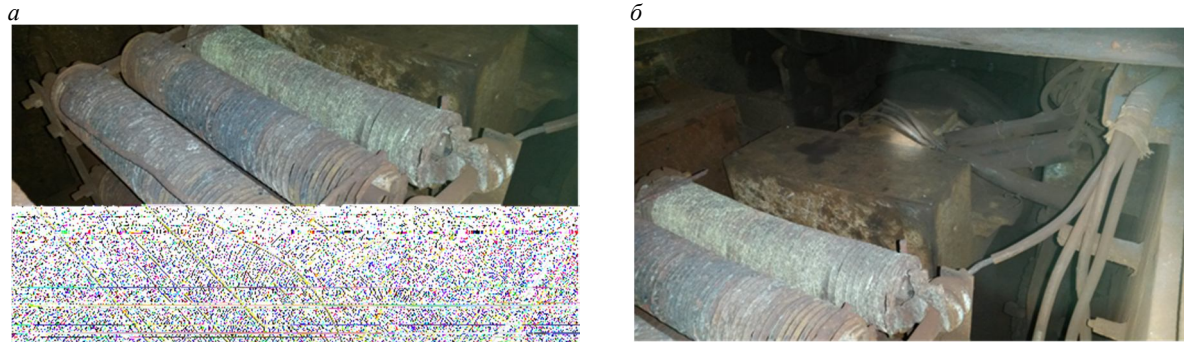


Рис. 2. Секція гальмівного реостату (а) та її електричне з'єднання (б) підсистеми гальмування електровозу К14

Відмінною рисою реалізації сили електричного гальмування шахтних електровозів є змінне значення коефіцієнта зчеплення коліс електровоза з рейками. У місцях завантаження (розвантаження) коефіцієнт зчеплення коліс електровоза з рейками відрізняється в 1,5-2 рази від коефіцієнта зчеплення на прямолінійній ділянці [8]. Крім того, при цьому дійсне значення коефіцієнта зчеплення на окремих ділянках відрізняється від середньої (розрахункової) величини на 30-50%.

Якщо сила тяги буде перевищувати силу зчеплення, то настане буксування – ковзання коліс електровозу по рейках – і з'явиться кінетичне тертя (тертя ковзання). Коефіцієнт кінетичного тертя нижче коефіцієнта тертя у спокої, тому сила зчеплення впаде до значення, обумовленого тертям ковзання, і відповідно сила тяги, передана рамі електровоза, також зменшиться.

Коефіцієнт зчеплення електровозу зазвичай не рівний коефіцієнту зчеплення однієї колісної пари. При індивідуальному приводі, широко застосовуваному в електричній тязі, на коефіцієнт зчеплення електровозу впливає розбіжність характеристик тягових двигунів і можлива деяка нерівність діаметрів коліс. При цьому виходять неоднакові дотичні сили тяги на ободі коліс різних колісних пара. Крім того, при роботі тягових двигунів відбувається перерозподіл навантажень на вісі колісних пара – одні вісі трохи розвантажуються, а інші перевантажуються. Зміна сили притиснення коліс до рейок відбувається також при проходженні ними нерівностей шляху й внаслідок динамічного впливу коливань частин, що підвішені на ресорах рухомого складу.

Всі вказані вище явища змушують додатково знижувати розрахункове значення коефіцієнта зчеплення електровоза у порівнянні з його значенням для однієї колісної пари, тому що при реалізації сили тяги жодна з колісних пара не повинна буксувати.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що величина коефіцієнта зчеплення електровозу різко знижується через покриття рейок рідким брудом і вугільним пилом. Тими ж дослідженнями встановлено, що коефіцієнт зчеплення у всіх випадках при русі вище, чому при русі.

У залізничних шахтах вугільний та сланцевий пил відсутні, але наявність вологи й рідкого бруду також знижує величину коефіцієнта зчеплення.

Відповідно до вищевикладеного слід зробити висновок про неприйнятність існуючих схем автоматичного електричного гальмування вимогам, пропонованим до підсистем гальмування, що як не враховують реальні умови експлуатації шахтних електровозів. Основними з них є:

- відсутність додаткового джерела живлення;
- наявність на електровозі гальмівних опорів.

Схема автоматичного електричного гальмування повинна спрацьовувати при неможливості нормальної роботи при зниженні рівня напруги в контактній мережі або її зникненні.

Безконтактне регулювання тягових електроприводів на базі імпульсних перетворювачів, які можуть бути виконані на силових тиристорах або на транзисторах, наприклад типу IGBT, забезпечує плавне, безконтактне регулювання тягового електропривода, виключаючи реостатні втрати (економія електроенергії 10-16%), суттєво спрощує процес регулювання електроприводом за рахунок виключення складного регулювання знижується зношування механічної частини поїзда.

Схеми імпульсного регулювання практично добре відпрацьовані й надійні в експлуатації, але теоретична частина завдання переходу на імпульсне регулювання вимагає узагальненого розв'язку, зокрема у зв'язку із застосуванням нової елементної бази (транзистори IGBT).

Рівень розробки електрорухомого складу постійного струму з імпульсними перетворювачами за кордоном може бути оцінений як перехід від експериментальних зразків до серійного виробництва. Сюди можна віднести поїзди Шведські електровози ASEA, SAAB та інші, які перебувають в експлуатації більш 20 років.

Імпульсне регулювання реалізується імпульсними перетворювачами, виконаними на тиристорах (одноопераційних або, тих що замикаються GTO) або на силових транзисторах IGBT. Але процес імпульсного регулювання супроводжується пульсаціями струму двигуна, причому на двигун діють імпульси напруги прямокутної форми з амплітудою, рівною напрузі джерела.

Основною причиною виходу тягових двигунів з ладу є пробій обмоток, розпаювання бандажів. Це свідчить про підвищене нагрівання тягових двигунів, що відбувається за досить короткий період часу.

Тому основним завданням ставиться розробка системи електричного гальмування тягових електричних двигунів, що ефективно функціонує в усім діапазоні робочих швидкостей шахтного електровозу, а також при його роботі в зоні надлишкового ковзання, з максимальним використанням гальмових властивостей тягового електропривода та мінімізацією впливу коливань та короточасних зникнень напруги живлення.

Отже, імпульсне регулювання доцільне для модернізації електровозів; що експлуатуються, при цьому зберігається основне встаткування (тягові двигуни й уся механічна частина), демонтується основна частина найменш надійного електроустаткування (силові контролери й інша контактна апаратура). В результаті може бути продовжений ресурс електровозу (зазвичай на 15 років). При цьому забезпечується найдешевший варіант модернізації електропоїздів з енергозбереженням і з подовженням ресурсу. Однак, в планах подальшої перспективи розробки слід вести по тягових електроприводах з асинхронними тяговими двигунами.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Можливість виконувати перетворювачі на базі IGBT транзисторів, які можна вважати ідеальними ключовими елементами, які не мають контурів ємнісної комутації, значно полегшує розрахунки зовнішніх і регулювальних характеристик електропривода та побудову системи керування. Чергове завдання полягає в тому, щоб розробити теорію комплексного розрахунку систем з імпульсними перетворювачами, враховуючи при цьому процеси в системах регулювання й керування, а також врахувати специфічні обмеження електрорухомого складу, наприклад по зчепленню. Це дозволить виконувати комплексне проектування систем імпульсного регулювання за критерієм досягнення найкращих показників роботи електровозів, тобто мінімальний шлях гальмування – максимальна зчіпна вага, для заданої технічної швидкості.

Список літератури

1. **Волотковський С.А.** Рудничная электровозная тяга. -М.: Недра, 1981. - 389с.
2. **Пироженок В.Х.** Рудничные электровозы с тиристорным приводом. - К.: Техніка, 1981. - 159 с.
3. **Синчук О.Н.** Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых элект-роприводов 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. – Киев: ИЕДНАУ, 2006. – 252с.
4. **Тихменев Б.Н., Трахтман Л.Н.** Подвижный состав электрифицированных железных дорог. - .М.: Транспорт, 1980. - 471 с.
5. **Зеленов А.Б.** Теория электропривода. Часть 1. Алчевск: ИПЦ «Лад», ДонГТУ, 2005.
6. **Алексеев Н.И.** Оптимизация систем электрической тяги в подземных выработках шахт. - М.: Недра, 1979. - 252 с.
7. **Синчук О.Н., Чумак В.В., Ершов О.В.** Импульсные системы управления и защита на рудничном электровозном транспорте. Монография – АДЕФ – Украина, 1998. – 280 с.
8. **Синчук О.Н.** Шахтный электровозный транспорт. Теория, конструкции, электрооборудование / О.Н. Синчук, Э.С. Гузов, В.Л. Дебелый, Л.Л. Дебелый; под ред. докт. техн. наук, проф. О.Н. Синчука. – Кривой Рог - Донецк: ЧП Щербатых А. В., 2015. – 296 с.
9. **Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А.** Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. - М.: Транспорт, 1986. - 229 с.
10. **Бирзникс Л.В.** Импульсные преобразователи постоянного тока. - М.: Энергия, 1974. – 256с.

Рукопис подано до редакції 10.04.2018