

Рис. 2. Залежність текущего коэффициента вскрыши (1) и объемов вскрышных работ (2) от производительности карьера по руде для случая, обусловленного только реконструкцией рабочего борта карьера: 3 - постоянный коэффициент вскрыши; 4 - объем вскрышных работ при постоянном коэффициенте вскрыши; 5 - отставание вскрышных работ

Выводы. Результаты проведенных исследований показали, что при увеличении производительности карьера по руде объемы вскрышных работ увеличиваются не пропорционально увеличению производительности по руде, а в большей степени; т.е., растет коэффициент вскрыши. Несоблюдение выявленных закономерностей при планировании

горных работ часто приводит к отставанию вскрышных работ. На основе этого разработана методика определения размера отставания вскрышных работ от необходимых объемов. По этой методике были определены объемы отставания вскрышных работ от необходимых на некоторых карьерах Кривбасса [13].

Список литературы

1. Анистратов Ю.И. Открытые горные работы. / Ю.И. Анистратов, К.Ю. Анистратов, М.И. Щадов // Справочник по открытым горным работам. – М.: НТЦ «Горное дело». 2010. - 700 с.
2. Арсентьев А.И. Определение производительности и границ карьеров / А.И. Арсентьев. - 2-е издание переработанное и дополненное – М.: Недра, 1970. – 319 с.
3. Арсентьев А.И. Производительность карьеров / А.И. Арсентьев. - Москва: Издательство Санкт-Петербургский горный институт. – 2002. – 85 с.
4. Новожилов М.Г. Высокопроизводительные глубокие карьеры / М.Г. Новожилов, А.Ю. Дриженко, А.М. Маевский [и др.]. Москва: Недра. – 1984. – 188 с.
5. Ржевский В.В. Открытые горные работы в сложных условиях / В.В. Ржевский, Ю.И. Анистратов, С.А. Ильин. – М.: Недра, 1964. – 294 с.
6. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 1 и 2. – М.: Недра, 1985.
7. Дриженко А.Ю. Поддержание производительности мощных железорудных карьеров при понижении горных работ / А.Ю. Дриженко, В.М. Богданов, В.П. Мартыненко [и др.] // Горный журнал. - 1995. - № 9. - С.28-32.
8. Дриженко А.Ю. Открытая разработка железных руд Украины / Дриженко А.Ю., Козенко Г.В., Рыкус А.А. – Полтава: Полтавський літератор. 2009.
9. Ковальчук В.А. Оптимизация параметров концентрации горных работ в железорудных карьерах: дис. ... доктора технических наук: 05.15.03 / Ковальчук Виктор Анатольевич. - Кривой Рог, 2000. - 286 с.
10. Четверик М.С. Методика определения производительности карьера, достижимой по горнотехническим возможностям / М.С. Четверик, О.А. Медведева // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск, 2002. - № 15 – Т. 1. – С.94-98.
11. Близиюков В.Г. Определение главных параметров карьера с учетом качества руды. / В.Г. Близиюков – М.: Недра, 1978. - 151 с.
12. Близиюков В.Г. Проектирование главных параметров группы карьеров / В.Г. Близиюков, И.И. Дейнега // Разработка рудных месторождений. – Киев: Техника. - 1980. - Вып. 29. - С.42-46.
13. Ю.Г. Вилкул О проблеме отставания вскрышных работ в железорудных карьерах / Ю.Г. Вилкул, С.А. Луценко, О.Ю. Близиюкова // Металлургическая и горнорудная промышленность - 2013. - № 3. - С. 92–96.

Рукопис подано до редакції 31.03.16

УДК 656.11

А.В. ВЕСНІН, В.О. СІСТУК, кандидати. техн. наук, доц.,
А.О.БОГАЧЕВСЬКИЙ, асистент, Криворізький національний університет

КІНЦЕВО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ОБМОТКИ ТЯГОВОГО ДВИГУНА КАР'ЄРНОГО САМОСКИДА

Мета. Метою роботи є дослідження механізму старіння ізоляції обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида при потраплянні у тріщини лакового покриття залізрудного пилю. Об'єктом дослідження є ізоляція якірної обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида. Предметом дослідження є процес руйнування лобових частин якірної обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида під дією термомеханічних навантажень та електромагнітних властивостей часток залізрудного пилю.

Методи дослідження. У роботі було використано комп'ютерне моделювання для проведення термічного аналізу лакового покриття обмотки якоря тягового двигуна кар'єрного самоскида, аналізу напружено-деформованого стану лобових частин обмотки з урахуванням впливу залізородного пилу певних фракцій, втомного аналізу лакового покриття обмотки при накопиченні пилу у її тріщинах, аналізу електромагнітної індукції котушки якоря.

Наукова новизна. Наукову цінність представляє отримана вперше залежність проценту пошкодження ізоляції обмотки якоря тягового двигуна кар'єрного самоскида від наробітку тягового двигуна за різних дорожньо-транспортних умов.

Практична значимість. У роботі досліджено потрапляння і накопичення часток залізородного пилу у тріщинах лакового покриття якірної обмотки двигуна на різних стадіях розвитку даного процесу. За допомогою методу кінцево-елементного аналізу розглянуто процес руйнування лакового покриття з плином часу при наявності часток пилу у тріщинах різних шарів ізоляції. На основі отриманої залежності ступеня пошкоджень ізоляції від часу роботи двигуна, з'являється можливість прогнозування терміну служби двигуна з урахуванням особливостей перевізного процесу у кар'єрі.

Результати. Проведений аналіз показав, що процес заповнення залізородним пилом тріщин лобових частин ізоляції обмотки тягового двигуна пов'язаний із циклічним характером струмових навантажень, при наявності часток пилу у тріщинах температура лакового покриття перевищує температуру плавлення обмотки, що викликає значний прогін її лобової частини. При повному заповненні тріщин покриття частинками залізородного пилу відбувається миттєве руйнування лобових частин ізоляції.

Ключові слова: кар'єрний самоскид, тяговий двигун, старіння ізоляції, струмове навантаження, залізородний пил, руйнування, трітинг, SolidWorks Simulation, термічний аналіз, втомний аналіз, термін служби.

Проблема та її зв'язок з науковими та прикладними завданнями. Одними з найважливіших факторів зносу і старіння ізоляції якірних обмоток тягових електричних машин є механічні і термомеханічні навантаження. Джерелами механічних впливів зазвичай є електродинамічні сили, неврівноваженість обертових частин, відцентрові зусилля, поштовхи й удари, що передаються з боку приводів або механізмів. Термомеханічними є навантаження, що виникають у результаті періодичних нагрівів і охолоджень обмотки.

На основі термічного кінцево-елементного аналізу ізоляції якірної обмотки тягових двигунів постійного струму кар'єрних самоскидів вантажопідйомністю 136 т нами було встановлено, що періодичність їх нагріву та охолодження напряму пов'язана зі повздовжнім профілем трас, на яких відбувається перевезення гірничої маси [1]. Це дозволяє стверджувати, що незважаючи на інерційність протікання теплового процесу [2], динаміка термомеханічних навантажень якірної обмотки носить стрибкоподібний характер. Додатковим фактором впливу, вже механічного, на процес старіння даного типу ізоляції є потрапляння у середину тягового двигуна залізородного пилу, який пропускає система охолодження та вентиляції тягового приводу [3]. Володіючи електромагнітними властивостями [4], частинки пилу певної фракції створюють навколо себе власне електричне поле, тим самим, налипаючи на поверхні ізоляції обмотки та заповнюючи тріщини, що попередньо утворились під дією термомеханічних навантажень. Можна висунути припущення, що такий характер взаємодії часток пилу з лаковим покриттям обмотки призводить й до подальшого розкриття тріщин. Слід відмітити, що взагалі вплив електричного поля на строки служби будь-якої ізоляції досліджено недостатньо.

Отже, особливості руху на трасі та властивості вантажу безпосередньо впливають на процес старіння ізоляції тягових електричних машин та обумовлюють специфіку її руйнування. У світі сказаного, зважаючи на описане вище специфічне поєднання термомеханічних й механічних факторів впливу, необхідним стає дослідження процесу старіння ізоляції якірної обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида для умов експлуатації на родовищах з видобутку залізних руд.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження процесу старіння обмоток електричних машин кар'єрних самоскидів можна проводити, спираючись на досвід експлуатації двигунів постійного струму у складі приводів електропотягів. Відомо, що основними факторами впливу на безвідмовність роботи таких двигунів є температура та вологість навколишнього повітря, величина, коливання та час впливу струмового навантаження, інтенсивність та схема вентиляції двигуна [0]. Струмові навантаження, які залежать від режимів експлуатації техніки, розглядаються у якості основного чинника теплового старіння ізоляції. У зв'язку з цим, з метою визначення термінів служби ізоляції перед усім, використовується закон температурного старіння (Вант Гоффа Арреніуса) [0]. При цьому життєвий цикл електричної машини представлено у вигляді лінійної залежності її ресурсу від часу експлуатації, де кут між графіком та віссю ординат є швидкістю старіння ізоляції [7]. Випробування електричної машини в камері теплоти та вологи, на вібростенді при впливі на неї певної вологості, температури та віброшвидкості до-

зволяє отримати дані про згасання акустичних сигналів, пов'язаних зі зміною модуля пружності ізоляції, що говорить про ступень її старіння [5,7,8]. Встановлення термінів служби ізоляції в залежності від інших факторів потребує низькі додаткових експериментальних досліджень з обробкою результатів за допомогою регресійного аналізу, що не дозволяє використовувати отримані залежності при зміні вхідних параметрів [7,8]. Важливим параметром, що необхідно враховувати при аналізі впливу температури на процес старіння ізоляції, є визначення точок локального перегріву. Методом САЕ-моделювання, нами було встановлено, що для якірних обмоток тягових двигунів кар'єрних самоскидів, місцями, що характеризуються підвищеними температурами у процесі експлуатації, є лобові частини обмотки збоку щіточно-колекторного вузла [0]. Слід зауважити, що саме складні конструктивні особливості якірної обмотки обумовлюють вирішення задачі теплопередачі за допомогою САЕ-моделювання. Незважаючи на значний об'єм експериментальних та теоретичних досліджень процесу старіння ізоляції електричних машин, чистота охолоджуючого повітря залишається тим фактором, вплив якого висвітлено недостатньо, а механізм руйнування лакового покриття якірної обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида при потраплянні у тріщини покриття часток залізорудного пилу взагалі не розглядається у відкритих джерелах.

Постановка задачі. Метою роботи є розкриття механізму старіння ізоляції обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида з урахуванням впливу електромагнітного залізорудного пилу, що потрапляє у порожнину двигуна з охолоджуючим повітрям.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

дослідити процес заповнення залізорудним пилом тріщин лобових частин ізоляції обмотки тягового двигуна;

розкрити механізм руйнування лобових частин ізоляції при налипанні часток залізорудного пилу;

провести втомний аналіз лобових частин ізоляції обмотки з урахуванням наявності залізорудного пилу у її дефектах;

встановити залежності проценту пошкоджень ізоляції від наробітку тягових двигунів з урахуванням агресивного впливу часток залізорудного пилу.

Викладення матеріалу і результати. Загальне руйнування ізоляції, викликане різними причинами (тепловими, механічними, електричними), супроводжується розшаруванням і розпушенням ізоляції, утворенням в ній пор, порожнин (повітряних або газових прошарків), тріщин [2,0]. З появою таких неоднорідностей в ізоляції розвиваються іонізаційні процеси, що супроводжуються прогресуючим її руйнуванням. У порожнинах ізоляції, особливо при перенапруженнях, виникають часткові розряди, що руйнують окремі шари ізоляції за рахунок теплового ефекту і механічного розщеплення.

Крім того, розряди супроводжуються хімічними реакціями з утворенням озону, взаємодія якого з азотом повітря і парами води призводить до утворення азотної кислоти, що руйнівні діє на ізоляцію [0].

У процесі перевезення гірничої маси відбувається нагрів струмопровідних елементів електромеханічної трансмісії, під час якого лобові частини якірної обмотки деформуються з руйнуванням лакового покриття переважно з утворенням тріщин у вигляді деревоподібних триїнгів.

Термічний та втомний кінцево-елементний аналіз лобових частин якірних обмоток тягових двигунів кар'єрних самоскидів БелА3-75131 дозволив встановити місця локалізації мікротріщин [0,0], що виникають під впливом коливань струмових навантажень, обумовлених циклічністю транспортного процесу з використанням автомобільного промислового транспорту.

Вірогідність потрапляння залізорудного пилу в триїнги, що утворюються, пов'язана з роботою системи охолодження та вентиляції тягового приводу та безпосередньо визначається електромагнітними властивостями часток пилу.

Можливість затримання часток пилу певної фракції у тріщинах виникає у разі перевищення електромагнітної сили, утворюваною частинкою, сили охолоджуючого повітря, за якої система охолодження не здатна видувати високодисперсний пил з триїнгів.

Для встановлення даної можливості необхідно провести розрахунок величини магнітної індукції котушки якоря. З цією метою обрано програмний продукт ELCUT [12], що використовується для теплового та електромагнітного аналізу твердих тіл.

Епюру магнітної індукції поперечного розрізу котушки якоря, отриману за результатами моделювання, представлено на рис. 1.

Величина магнітної індукції має максимальні показники на поверхневих частинах обмотки та коливається від 0,06 Тл до 0,12 Тл, що перевищує силу охолоджуючого повітря майже у 4 рази (рис. 2).

Отже, величини електромагнітної індукції котушки якоря достатньо для налипання часток пилу на лаковій поверхні у випадку потрапляння останніх в електромагнітне поле котушки.

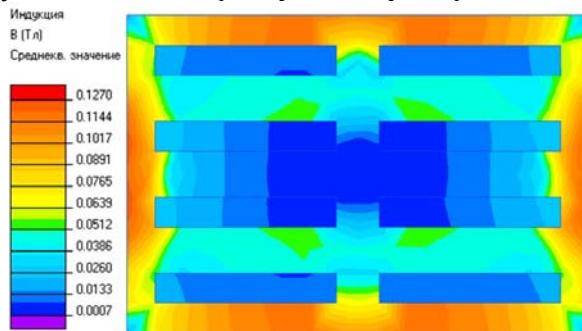


Рис. 1. Магнітна індукція котушки якоря у розрізі

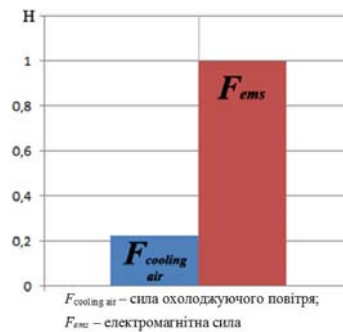


Рис. 2. Графік діючих сил на частинки пилу

При попаданні частинки пилу в знову утворювальну тріщину, вона залишається у ній, незважаючи на повітряний обдув обмотки. Наступна частинка пилу провшттовхує попередню углиб покриття.

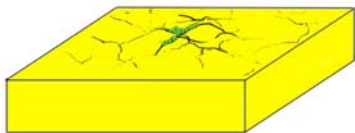


Рис. 3. Візуалізація процесу накопичення залізорудного пилу у тріщинах ізоляції

Процес повторюється до переходу пилу, що накоплюється, на нові шари лаку (рис. 3,4).

При цьому виникає фіксація часток пилу за рахунок циклів температурного розширення та стиснення ізоляційного матеріалу, коли при розширенні частинка проникає вглибину лакового шару, а при стисненні вона фіксується на даній глибині.

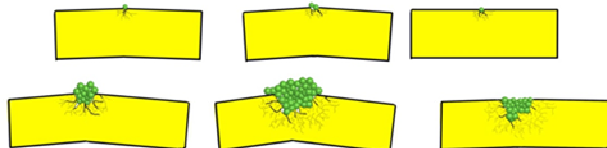


Рис. 4. Візуалізація процесу накопичення залізорудного пилу у тріщинах ізоляції у розрізі

Циклічність описаного процесу обумовлена особливостями роботи кар'єрного автомобільного транспорту, яка полягає у чергуванні руху на спуск та підйом.

Електромагнітні сили фракцій пилу сприяють зниженню пружних властивостей лакового покриття, а при зменшенні струмових навантажень викликають додаткові руйнівні впливи. Кінцевим моментом руйнування лакового покриття виступає його пробій, що виникає при повному закупорюванні тріщини аж до мідного провідника. Для визначення температурного стану та деформацій лакового покриття з урахуванням повного заповнення тріщин пилом, створено solid-модель лобової частини обмотки у середовищі SolidWorks Simulation [13], оскільки саме лобова частина схильна до максимального нагріву, що описано вище (рис. 5).

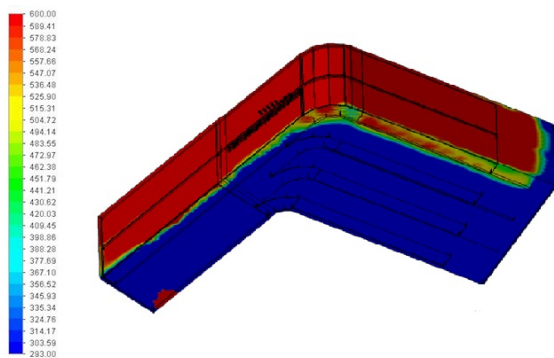


Рис. 5. САЕ-модель лобової частини обмотки з накопиченням залізорудного пилу у тріщинах ізоляції

Термічний аналіз показав, що при наявності часток пилу температура лакового покриття перевищує температуру його плавлення незалежно від характеру та довжини профіля трас транспортування, що визначають величину коливань та тривалість струмових навантажень. При наявності таких теплових навантажень лакове покриття не може відпрацювати більше одного циклу транспортування (рис. 6).

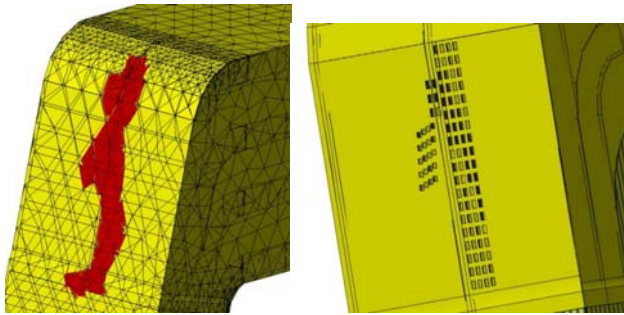


Рис. 6. Епюра температурного стану з урахуванням наявності пилу

Прогин лобової частини обмотки під впливом теплових навантажень у комбінації з накопиченням залізорудного пилу у тріщинах покриття доходить до 6 мм, що є значним показником (рис. 7).

Ґрунтуючись на результатах втомного кінцево-елементного аналізу ізоляції з урахуванням впливу фактору запиленості охолоджуючого повітря, вперше отримано залежність між процентом пошкоджень обмотки та наробітком тягового двигуна, що представляє собою криву терміну служби якірної обмотки (рис. 8).

Швидкість розвитку пошкоджень залежить від довжини та складності профілю трас транспортування. Так, при перевезенні гірничої маси тільки на трасі довжиною 4697 м з наявністю ділянки з ухилом у 15%, тяговий двигун виходить з ладу за 2,04 року чистої експлуатації, що відповідає 31697 рейсам проведеним на досліджуваній трасі та перевищує гарантійний термін служби на 0,04 року. При роботі самоскида на трасі довжиною 5529 м з найбільшим ухилом у 7,5%, показник чистої експлуатації двигуна становитиме 2,46 року (36013 рейса).

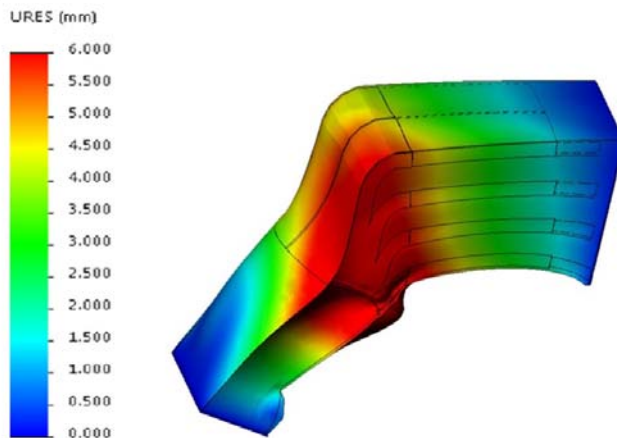
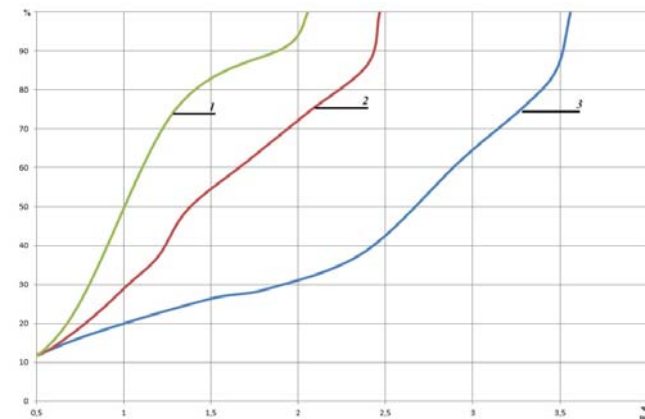


Рис. 7. Епюра переміщення з урахуванням наявності пилу

На третій трасі довжиною у 2980 м з максимальним ухилом у 6,9%, даний показник складатиме 3,56 року (97118 рейса).

Рис. 8. Крива терміну служби якірної обмотки, м: 1 – при довжині траси транспортування 4697; 2 – при довжині траси у 5529; 3 – на трасі довжиною 2980

з урахуванням електромагнітних властивостей залізорудного пилу, що потрапляє у порожнину двигуна з охолоджуючим повітрям. Проміжними результатами дослідження є такі положення:



хвилеподібний процес заповнення залізорудним пилом тріщин лобових частин ізоляції обмотки тягового двигуна обумовлений циклічним характером струмових навантажень, пов'язаних зі специфікою переміщення вантажів у кар'єрі;

при наявності часток пилу температура лакового покриття перевищує температуру його плавлення;

при повному заповненні тріщин лакового покриття частинками залізорудного пилу відбувається миттєве руйнування лобових частин ізоляції;

прогин лобової частини обмотки під впливом теплових навантажень у комбінації з накопиченням залізорудного пилу у тріщинах становить 6 мм;

вперше встановлена залежність проценту пошкоджень ізоляції якірної обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида БелАЗ-75131 від часу його чистої роботи, яка дозволяє прогнозувати терміни служби тягової електричної машини у різних умовах експлуатації.

Список літератури

1. Определение температурных показателей лакового покрытия якорной обмотки тягового двигателя карьерного самосвала БелАЗ-75131 методом САЕ-моделирования / **Монастырский Ю. А., Веснин А. В., Систук В. А., Богачевский А. А.** // Сетевое периодическое издание «Проблемы недропользования». – Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения РАН. – С. 77 – 84.
2. **Суханкин Г.В., Герцен Н.Т.** Модель старения изоляции обмоток статора электрической машины // Вестник ИжГТУ. - Ижевск: 2012. – С. 80 – 82.
3. **Систук В. О.** Вплив високо дисперсного пилу залізородних кар'єрів на стан електричних машин тягового електроприводу самоскидів / В. О. Систук, А. О. Богачевський // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2014. — Вып. 118. С. 168–175.
4. **Vesnin A. V.** The industrial dust properties as a wear factor of pit trucks electric machines elements / A. V. Vesnin, V. O. Sistuk, A. O. Bogachevskiy // Metallurgical and Mining Industry, 2015, No. 3. – Dnipropetrovsk. – P. 272 – 275.
5. **Соколов О.О.** Повышение ресурса тяговых электрических машин электропоездов постоянного тока // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС (МИИТ)), 2015. - 201 с.
6. **Мамчур Д.Г., Осадчук Ю.Г.** Підходи до визначення стану ізоляції електричних машин // Вісник КДПУ. – Кременчук: Вип 4, 2006. - С. 122 – 129.
7. Catalin Rusu-Zagar, Petru Notingher Method for Estimating the Lifetime of Electric Motors Insulation // The 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering. - Bucharest: 2013. - P.7.
8. **Худий Є.Г.** Сучасні методи діагностики стану ізоляції електричних машин [Текст] / **Худий Є.Г., Пельтек І.І.** // Сб. научн. трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. №28 - Вестник НТУ "ХПИ", 2010. - ISSN 2079-8024
9. **Веснін А. В.** Моделювання температурних навантажень лакового покриття якірних обмоток тягового двигуна кар'єрного самоскида / **А.В. Веснін, В.О. Систук, А.О. Богачевський** // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології [Збірка матеріалів IV Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції (17-19 листопада 2015 р., м. Харків)]. – Харків: ХНАДУ, 2015. – С.121 – 123.
10. Термический анализ якорной обмотки тягового двигателя карьерного самосвала БелАЗ-75131 методом компьютерного моделирования / **Ю.А. Монастырский, А.В. Веснин, В.А. Систук, А.А. Богачевский** // Научно-практическая конференция «Проблемы карьерного транспорта: Перспективные решения в технике и технологиях». Тезисы, 2–4 декабря 2015. – Екатеринбург: VI Уральский горнопромышленный форум. – С. 86 –87.
11. **Веснін А. В.** Моделювання напружено-деформованого стану якірної обмотки тягового двигуна кар'єрного самоскида / **А.В. Веснін, В.О. Систук, А.О. Богачевський** // Проблеми и перспективы развития железнодорожного транспорта: Тезисы 76 Международной научно-практической конференции (Днепропетровск, 19 –20 мая 2016 г.) – Д.: ДИИТ, 2016. С. 60 –61.
12. ELCUT. Моделирование полей методом конечных элементов. Руководство пользователя [Fields modeling by finite elements. Manual]– St. Petersburg. Proizvodstvennyi cooperative TOR, 2010.
13. **Lombard M.** Solidworks 2013 Bible. **Lombard M.** / John Wiley & Sons Inc., 2013. – P. 1299.

Рукопис подано до редакції 31.03.16

УДК 612.17: 628.511

А.А. ГУРИН, д-р техн. наук, проф., Н.А. ТАРАН, младший научн. сотр.,
Криворожский национальный университет,
А.В. ШЕВЧЕНКО, директор по охране труда, ПАО «ЮГОК»

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАКРЕПЛЕНИЕ ПЫЛЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТРАБОТАННЫХ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

Хвостохранилища горнообогатительных комбинатов являются одним из основных источников загрязнения окружающей среды пылью. С одного гектара сухой поверхности за сутки сдувается 2-5 т пыли в составе которой содержится более 95% частиц менее 4,0 мкм при содержании в них 60-70% SiO₂. Концентрация пыли в воздухе за пределами хвостохранилищ превышает допустимые нормы в 5-6 раз, что приводит к заболеванию бронхитом и пневмокониозом. Среди известных способов и средств предупреждения пылеобразования на отработанных хвостохранилищах (таких как покрытие хвостов пленками, увлажнение их водными и связывающими растворами и др.). Наиболее эффективными являются биологические способы закрепления их поверхности, которые не токсичны, экономичны, долговечные, имеют высокую пылеудерживающую способность и не приводят к вторичному загрязнению атмосферы. На первое место выступает поиск видов растений, которые способны успешно расти и надежно закреп-