

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ РУДНИКОВИХ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

*Г.М. Бажін, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Україна*

Обґрунтована необхідність та розглянуто принципи побудови математичної моделі функціонування системи захисту рудникового електрообладнання. Виконано моделювання процесу її функціонування з урахуванням взаємозв'язку імовірнісних факторів появи аварійних ситуацій та показників надійності захисту.

Необхідність підвищення продуктивності робіт у гірництві обумовлює зростання енергооснащеності праці на підземних гірничих роботах, що в свою чергу потребує впровадження в експлуатацію електроустановок підвищеної потужності в системах електропривода й електропостачання рудникового обладнання. Однак зростання продуктивності та інтенсивності навантажень на устаткування призводить до росту збитків у випадку його простою. Простої в системах рудникового електропостачання й електропривода можуть відбуватися як по технологічних причинах, так і в результаті експлуатаційних відмов у роботі, або внаслідок аварії. Якщо технологічні простої визначаються умовами застосування й експлуатації устаткування, що обумовлені гірничо-геологічними факторами і виробничими причинами, то відмови в роботі електрообладнання більшою мірою залежать від його надійності та режимів роботи. Аварійні простої обумовлені у більшості випадків відмовами в роботі пристроїв захисту, викликаних появою аварійної ситуації. Для рудникового електрообладнання основними видами таких ситуацій є короткі замикання, перенапруга, неприпустимі перевантаження, неповнофазний режим роботи, витоки струму при порушенні ізоляції та ін. Для локалізації наслідків аварійної ситуації, служать пристрої захисту, що відключають пошкоджене приєднання або апарат і перешкоджають подальшому розвитку аварії.

Крім безпосереднього впливу на показники надійності електрообладнання, умови експлуатації визначають, також, і вимоги до них. Чим важче умови застосування й відповідальніше функції, що виконуються апаратурою, тим вище вимоги до її надійності. При цьому надійність може оцінюватися по різних кількісних показниках оптимальне значення яких визначається економічними критеріями, зокрема, для систем захисту – це мінімум втрат, викликаних її відмовами. Середні втрати на одну аварію елемента, що захищається, містять у собі складові, що обумовлені середньою вартістю його відновлення та ліквідації наслідків аварії, середнім збитком від наслідків відмови (псування продукції, сировини або устаткування в результаті порушення технологічного процесу) і збитками від перерви в технологічному процесі.

Додатково слід зазначити, що одним з небезпечних наслідків відмови пристроїв захисту електроустановок, що експлуатуються в умовах вугільних шахт, є зниження безпеки внаслідок можливості розвитку аварії й виникнення пожежі або вибуху в умовах шахтної атмосфери.

Крім навколишнього середовища на надійність роботи рудникового електрообладнання впливають ряд додаткових факторів експлуатації – об'єктивних і суб'єктивних. До об'єктивних факторів, у першу чергу, повинні бути віднесені режими роботи, що визначають характер теплового і механічного впливу навантаження на рудникове електрообладнання. Для пристроїв електропривода систем рудникового транспорту, видобувних і прохідницьких механізмів характерним є переривчасто-тривалий режим роботи, внаслідок чого нагрівання їх елементів носить циклічний характер. Крім того, елементи зазначених систем зазнають вібраційних навантажень. У той же час для пристроїв систем електропостачання, захисту й автоматики, навпаки, характерним є безперервний режим роботи при можливості вібраційних навантажень.

До додаткових суб'єктивних факторів треба, насамперед, віднести систему технічного обслуговування, що включає в себе своєчасне виявлення, ремонт і заміну вузлів, що вийшли з ладу, профілактику електрообладнання й т. ін. Суб'єктивні фактори багато в чому визначаються рівнем кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Якщо наявність об'єктивних факторів експлуатації визначається видом корисної копалини, що добувається, гірничо-геологічними умовами й технологією розробки родовища, а зниження ступеня впливу цих факторів на надійність електрообладнання здійснюється методами, які більше відносяться до пасивних (захищене виконання, зниження питомого навантаження, введення резерву), то суб'єктивні фактори піддаються активному впливу на них.

В цьому аспекті перспективними є дослідження з розгляду шляхів підвищення надійності складних технічних систем з використанням економічних критеріїв. Представлення електроустановки у вигляді відновлюваної системи зі схованими відмовами дозволило оцінити ефективність і оптимальну періодичність її контролю за економічним критерієм, використовуючи модель питомих витрат і прибутку [1]. Однак, запропоновані при цьому рекомендації не завжди можуть бути застосовані до рудникових електроустановок у цілому й систем їх захисту зокрема. Запропонований алгоритм обслуговування містить операції з проведення регламентних робіт, у проміжках між якими здійснюється періодичний контроль працездатності системи. Однак, відповідно до рекомендацій, для одержання мінімальних питомих витрат на одиницю часу роботи системи розподіл часу між профілактичними ремонтами повинен бути таким, щоб він був сумірним із середнім часом безвідмовної роботи засобів захисту й не менш, ніж на 1...2 порядку перевищував період між контрольними перевірками. У шахтних умовах контрольні перевірки й профілактичний ремонт найчастіше мають значну трудомісткість, а недостатня надійність системи внаслідок експлуатації в несприятливих умовах вимагає більш частих перевірок. Крім того, рекомендації не враховують періодичність аварійних ситуацій, хоча в умовах шахти вони можуть бути досить частими. Варто враховувати, що аварійна ситуація для пристроїв захисту також є перевіркою їхньої працездатності, і частота таких перевірок для розглянутих систем може істотно перевищувати оптимальну. Наприклад, тягова підстанція контактного електровозного транспорту зазнає впливу струмів к.з. 1...2 рази на добу [1], тобто аварійна ситуація може виявити несправність захисту раніше її контрольної перевірки результатом чого стане розвиток аварії. Крім того, перевірка працездатності пристроїв захисту у більшості випадків пов'язана зі спрацьовуванням силових комутаційних апаратів, що приводить до передчасного зношення й зниження надійності роботи останніх..

Ряд результатів теоретичних основ досліджень по обґрунтуванню структури й стратегії системи обслуговування рудничної апаратури знайшли відбиття в літературі і нормативних документах [3, 4]. У проведених дослідженнях справедливо відзначається, що одним з основних питань стратегії обслуговування складної системи є організація її контролю й профілактики періодичність яких оптимізується по показниках надійності [5].

Слід зазначити, що пристрої захисту мають свою специфіку впливу на надійність роботи електрообладнання. Їхня відмова не спричиняє відмову в роботі всієї установки, яка може експлуатуватися з несправним захистом тривалий час. Тому, у цілому ряді практичних випадків, наявність профілактичного контролю не впливає істотно на ефективність захисту [1]. Відповідно до нормативних документів [6] всі електроустановки повинні обладнуватися засобами захисту, склад яких також чітко визначений цим же документом. Однак ніде не обумовлюються критерії, по яких варто оцінювати ефективність функціонування цих пристроїв.

Оскільки надійність захисного пристрою не пов'язана напряду з показниками надійності електроустановки, у складі якої він знаходиться, виникає питання вибору критерію оцінки ефективності функціонування захисту. У зв'язку із цим існуючі показники надійності,, регламентовані стандартом (імовірність безвідмовної роботи, середній час наробітку на

відмову та ін.), при використанні їх стосовно до пристроїв захисту не дозволяють однозначно оцінити вплив надійності останніх на результуючу безвідмовність і безаварійність експлуатації електроустановок. Очевидно, що нераціональним є застосування недорогого, але малонадійного пристрою для локалізації аварії, що може викликати значний збиток, так само як і дорогого високонадійного пристрою для захисту від рідко повторюваної аварійної ситуації з малозначними втратами.

Дана робота присвячена розробці методів побудови математичної моделі функціонування системи захисту рудникових електроустановок від аварійних ситуацій з метою оцінки показників ефективності функціонування цієї системи й обґрунтування вимог до надійності захисних пристроїв. Модель повинна враховувати частість появи аварійних ситуацій і можливі збитки при відмові захисту. Актуальним є формулювання таких вимог на стадії проектування знову створюваного електрообладнання.

На цей час існує лише єдиний нормативний документ, що визначає перелік необхідних видів захисту електроустановок залежно від їх виду [6]. Подальший вибір захисного пристрою визначається лише його технічними даними (чутливість, тип вихідного сигналу й таке ін.) Відповідно до вимог при розробці нового виробу проектувальники вибирають із існуючого переліку той або інший пристрій захисту, надійність якого при подальшому використанні може виявитися недостатньою. Але проявляється цей недолік лише в процесі експлуатації, що може стати причиною істотних втрат.

Визначення методів обґрунтування вимог до надійності пристроїв захисту рудникових електроустановок передбачається виконати шляхом математичного моделювання процесу функціонування пристроїв захисту з урахуванням взаємозв'язку імовірнісних факторів появи аварійних ситуацій, показників надійності захисту, алгоритму й структури системи обслуговування устаткування й на основі аналізу розробленої моделі.

Аналіз функціонування пристроїв захисту рудникових електроустановок показує, що їхні відмови не є еквівалентними по своїх наслідках. Істотне значення мають послідовність моментів виникнення різних ситуацій у роботі електроустановки й системи його захисту. Аварії, як правило, передують відмова в схемі захисного пристрою, тобто події, у результаті появи якого захист не в змозі виконувати задані функції. Ця відмова, у випадку відсутності засобів контролю або самоконтролю його наявності, протягом деякого випадкового часу залишається невиявленим (прихованим). При порушенні режимів роботи в системі електропостачання, електроустановки (наприклад, коротке замикання) або із причин технологічного характеру (перевантаження), виникає аварійна ситуація. Несправний захист не може зробити відключення або виконати інші захисні функції й, в остаточному підсумку, настає аварія.

У зв'язку з тим, що процес функціонування захисту формується появою випадкових подій, необхідне коректне врахування у моделі регулярності перевірок. Виконання цієї вимоги можливо з введенням ряду допущень і представленням регулярного потоку перевірок потоком Ерланга.

Визначення показників надійності захисту, у тому числі й на етапі проектування, може бути виконане по відомих методиках [7]. При розрахунках можуть використовуватися довідкові й експериментальні дані про показники надійності окремих елементів захисних пристроїв [7, 8, 9, 10].

Розглянемо формування процесу появи аварії. Ця подія є випадковою і може виникнути при відмовах захисних пристроїв і появі аварійної ситуації, яка також є випадковою подією. Якщо розглядати тривалий відрізок часу, то поява аварійних ситуацій і аварій відбувається у випадкові моменти часу, тому їх зручно розглядати як потоки, хоча фактично для даного пристрою ці події можуть бути одиничними.

Одним з перших питань, що потрібно вирішити при дослідженні потоків, є вибір математичної моделі для їхнього опису (закону розподілу випадкової величини). Для аварійних ситуацій, що викликані відмовами, вибір теоретичного розподілу середнього часу напрацювання до відмови можливо здійснювати з використанням інформації про фізичні

процеси, у результаті яких проявляється той або інший розподіл. Іншими словами, обраному теоретичному розподілу повинна відповідати певна модель наближення об'єкта до відмови. Однак, недостатня вивченість фізики відмов, обмежує область застосування даного методу. Більш переважно у якості випадкового процесу розглядати безпосередньо деякий параметр, що характеризує надійність виробу. Можлива також комбінація обох методів.

Характеристики надійності елементів системи електропостачання, відмова яких викликає аварійні ситуації стосовно конкретного електрообладнання, можуть бути визначені експериментально або з літературних джерел. Імовірнісні характеристики виникнення аварійних ситуацій, що викликані причинами технологічного характеру, визначаються на підставі аналізу робочих режимів.

Вибір математичної моделі, що описує реальні потоки, у кожному конкретному випадку вирішується на підставі дослідження їхніх основних властивостей – стаціонарності ординарності й післядії [7]. Вимога ординарності, що означає практичну неможливість виникнення двох і більше подій одночасно, для рудникових електроустановок можна вважати виконаним, тому що аварії, а також кожна з аварійних ситуацій, що приводять до неї, у потоці подій приходять поодиночі. Крім того, практика дослідження потоків показала, що неординарність незначно впливає на структуру потоку й цим впливом без великого збитку для точності можна зневажити [11].

У той же час є ряд причин, що обумовлюють нестаціонарність і післядію, що у свою чергу істотно впливає на форму й параметри розподілу розглянутих потоків. Зовнішні впливи, що змінюються за певним (не випадковим) законом, призводять до нестаціонарності. В основному, це наслідок впливу кліматичних факторів навколишнього середовища. Для електрообладнання, що експлуатується в підземних умовах, характерною є відносна незмінність у часі температури вологості, режиму роботи й т.ін. Тому з достатньою вірогідністю можна вважати, що кліматичні зміни на поверхні не впливають на стаціонарність потоку відмов рудникового електрообладнання. Цей вивід не суперечить експериментальним даним [12]. Отже, для рудникового електрообладнання потік відмов може бути прийнятий стаціонарним.

Відомо, що післядія в потоках обумовлюється випадковими зовнішніми впливами. Однак, з літератури відомо, що при значній кількості елементів у системі, а ймовірність виникнення відмови кожного елемента мала та їхні відмови незалежні й кожний потік є стаціонарним, то сумарний потік також стаціонарний і не має післядії незалежно від закону розподілу наробітки між відмовами елементів. Сказане має місце в системах та пристроях захисту у склад яких входить велика кількість елементів відмова яких є однією з головних причин появи аварійних ситуацій і аварій. Можливість застосування в цьому випадку експоненціального закону розподілу напрацювання до відмови показана в роботах різних авторів [13]. Слід зазначити, що для систем, що працюють у важких умовах, також через якийсь час встановлюється експоненціальний закон розподілу часу між відмовами за рахунок багаторазової зміни елементів, що вийшли з ладу й перемішування "старих" і "нових" елементів. Крім того, як свідчить практика використання рудникової електроапаратури, лише 5 % відмов виникають у результаті старіння, зношення й таке ін, а наявність експоненціального закону розподілу часу безвідмовної роботи шахтних мереж і їхніх елементів підтверджується дослідними даними [14].

Таким чином, прийнявши певні допущення можна вважати, що для електроустановок системи рудникового електропостачання й електропривода щільність імовірності потоку аварійних ситуацій і аварій є постійною, тобто ймовірність потрапляння якоїсь з цих подій на часовий інтервал залежить від тривалості інтервалу й не залежить від його розташування на осі часу. Аварійні ситуації в потоках з'являються в послідовні моменти часу незалежно одна від одної й для будь-яких інтервалів часу число подій, що потрапили на один часовий інтервал, не залежить від числа подій, що потрапили на іншій. Це дає підставу вважати потоки аварійних ситуацій і аварій стаціонарними потоками без післядії. Загально відомо

якщо потік подій має властивості ординарності, стаціонарності й відсутності післядії, він є найпростішим або стаціонарним пуассоновським. Це дозволяє застосовувати для аналізу розглянутого класу систем методи теорії марковських процесів.

Представимо одиночну електроустановку із захистом від аварійних ситуацій як відновлювану систему без резервування. Розглянемо сталі стани, у яких вона може перебувати й причини переходу з одного стану в інше.

1. Справна робота. У цьому стані електроустановка перебуває в процесі функціонування в штатному режимі роботи, а система захисту в режимі контролювання робочих параметрів. Вихід цих параметрів за припустимі межі є подія, що свідчить про аварійну ситуацію.

2. Відключення захистом. З появою аварійної ситуації справний захист відключає електроустановку, яка у цьому стані може перебувати якийсь час. При включенні електроустановки вона переходить у режим справної роботи.

3. Відмова в системі захисту. При відмові захисту електроустановка продовжує функціонувати в режимі нормальної роботи, виконуючи свої функції. При виявленні відмови проводиться ремонт (відновлення) системи захисту або її елементів і електроустановка повертається в режим справної роботи.

4. Аварія. З появою аварійної ситуації несправний захист не в змозі відключити електроустановку, у результаті чого відбувається перехід аварійної ситуації в аварію. Після проведення відбудовних робіт або заміни електроустановки на справну, система переходить у режим нормальної роботи.

Перехід зі стану в стан відбувається в результаті випадкових подій, до яких відносяться поява аварійної ситуації й відмова захисту.

Функціонування зазначеної системи може бути представлено у вигляді графа, що формалізує процеси знаходження установки в кожному стані і переходи її в різні стани під час роботи. Позначимо стани системи символами:  $S_0$  – справна робота;  $S_1$  – стан після відключення справним захистом;  $S_2$  – відмова захисту в процесі нормальної роботи;  $S_3$  – аварія. У зв'язку з тим, що події, які викликають зміну станів системи є випадковими, їх можна розглядати як потоки. Інтенсивність переходів зі стану в стан під впливом потоків відмов захисних пристроїв і аварійних ситуацій позначимо символом  $\lambda$  з відповідними індексами, а інтенсивність переходів під впливом відновлень – символом  $\mu$ . Процес знаходження системи в кожному зі станів також позначимо символом  $\lambda$  з відповідними індексами. З урахуванням прийнятих позначень граф станів системи захисту прийме вид, показаний на рис. 1.

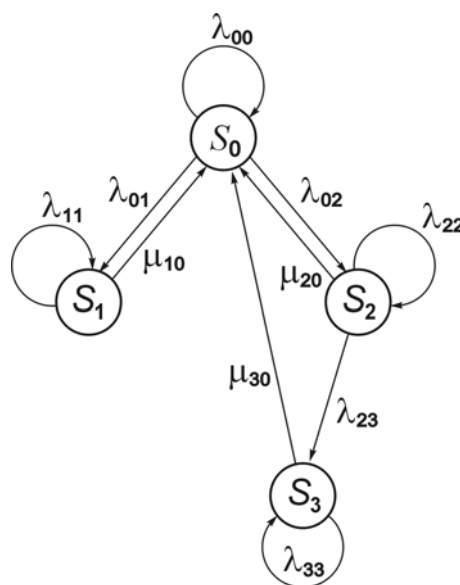


Рис. 1. Граф переходів станів системи, що обладнана пристроєм захисту

В зв'язку з тим, що стан системи змінюється в часі випадково, процеси, що протікають в ній, є випадковими, то їх хід і результат залежать від ряду випадкових факторів. Раніше було показано, що події, що переводять систему зі стану в стан можна розглядати як найпростіші потоки, тому процес, що протікає в системі може бути промодельований за схемою марковських випадкових процесів. Таким чином розглянута система є системою з дискретними станами й безперервним часом, і тому вона являє собою безперервний ланцюг Маркова.

Дана модель ураховує показники надійності пристрою захисту, параметри потоків аварійних ситуацій і їхній вплив на параметри потоків можливих аварій

Користуючись розміченим графом станів можна визначити ймовірності знаходження системи в кожному з них як функції часу й на підставі цього обчислити показник надійності захисту, що забезпечує задане зниження параметра потоку аварій. У свою чергу припустимий рівень аварійності може бути знайдений виходячи з економічних розрахунків.

#### Список літератури

1. Криулев С.Н. О выборе оптимальной периодичности сложной технической системы по экономическому критерию // Надежность и контроль качества. – 1979. – №1. – С. 47-56.
2. Рыжий В.А. Исследование электроснабжения откатки и разработка мероприятий, повышающих безопасность и надежность эксплуатации тяговых сетей шахт // Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии СССР: Тез. докл. / Всесоюз. науч.-техн. конф. Днепропетровск, 1975. С.226-228.
3. Ванев Б.Н., Вареник Е.А., Омельченко А.Н., Савицкий В.Н. Регламентация технического обслуживания и ремонта электрооборудования угольных шахт // Уголь Украины. – 2014. – №10. – С. 42-45.
4. Правила технічної експлуатації вугільних шахт: СОУ 10.1-00185790-002-2005. – К., 2006. – 354 с.
5. Павлов Ю.К. О подходе к обоснованию надежности восстанавливаемой радиоэлектронной аппаратуры с учетом возможности их реализации // Надежность и контроль качества. – 1977. – №5. – С. 43-46.
6. Правила улаштування електроустановок. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/06/ПУЕ>.
7. Певзнер Л.Д. Надежность горного электрооборудования и технических средств шахтной автоматики. – М.: Недра, 1983. – 198 с.
8. Надежность взрывозащищенного рудничного электрооборудования / под общ. ред. Б.Н. Ванеева. – М.: Недра, 1979. – 304 с.
9. MIL-HDBK-217F. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://snebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-217F-Notice2.pdf>
10. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. Межгосударственный стандарт.
11. Ястребенецкий М.А., Соляник Б.Л. Надежность промышленных автоматических систем в условиях эксплуатации. – М.: Энергия, 1978. – 169 с.
12. Галушко В. Н., Алферова Т. В., Алферов А. А. Определение показателей надежности электрических систем с учетом изменяющихся условий эксплуатации // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого, – 2013. – № 3. – С80-87.
13. Ушаков И.А. Приближенный метод расчета надежности систем с восстановлением // Надежность и контроль качества. – 1983. – №9. – С. 18-25.
14. Разгильдеев Г.И., Шалаев И.О. Математическая модель долговечности (расходования ресурса безопасности) высоковольтного взрывозащищенного электрооборудования // Вестник Кузбасского государственного технического университета, - 2011. – №8. - С55-57.