

УДК 621.313

ЙМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ РУДНИКОВОГО ЕЛЕКТРОВОЗА*Сидоренко В. М., ст. викл., Чорний О. П., д.т.н., проф., Сінчук І.О., асп.**Кременчуцький державний політехнічний університет імені Михайла Остроградського
39614, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20**E-mail: vsidorenko@ktp.polytech.poltava.ua, apch@polytech.poltava.ua*

Исследован механизм причин возникновения сбоев в электропитании и возникновения аварийных ситуаций в системе тягового электропривода рудничных электровозов. Получена и исследована вероятностная модель аварийных ситуаций. Выполнен синтез функции надежности системы. Обоснованы и исследованы оптимально необходимые режимы настройки системы защит тягового электропривода.

Ключевые слова: тяговый электропривод, аварийная ситуация, вероятностная модель.

A mechanism of appearing failures in the power supply and emergency situations in the system of hauling electric drive of mine electric locomotives is explored. The probabilistic model of emergency situations was got and explored. A synthesis of system reliability function is executed. The optimum necessary modes of tuning the system of defences of hauling electric drive were grounded and explored.

Key words: hauling electric drive, emergency situation, probabilistic model.

Вступ. У шахтах (рудниках) України експлуатуються біля 2 тис. електровозів різних видів та зчпних мас. Майже всі вони оснащені неекономічними та неефективними резисторно-контакторними системами керування (СК) тяговими електродвигунами постійного струму. Заміна даних систем на ефективні безконтактноімпульсні дозволить економити гірничим підприємствам 10-12% споживаної електричної енергії [1].

Аналіз попередніх досліджень. В останні п'ять років розроблено експериментальні зразки тягових електроприводів (ТЕП) як постійних, так і змінних струмів на основі IGBT-транзисторних перетворювачів для рудникових електровозів [2]. Проте, підтвердивши свої переваги, вищезазнані системи, на жаль, не стали предметом серійного впровадження. Однією з основних причин такого одіозного явища став факт наявності хаотичного відриву пантографа електровоза від живлячого контактного проводу (КП), коли частота відриву сягає 1-3 рази в секунду, а час – від 0,02 до 5 с. Це, призводячи до появи імпульсів наднапруги, провокує псевдоварійні та аварійні режими в ТЕП.

При цьому, якщо перші проявляються в збоях в роботі електроприводу, то другі – в ушкодженнях та виходу з ладу елементів системи керування.

З метою запобігання цього явища більшість розробників йшли по шляху ускладнення схемотехнічних рішень в напрямку підтримання на заданому рівні напруги живлення ТЕП в цілому та контуру пере-

творення електричної енергії в частковості. При цьому час «підтримання» напруги, як правило, вибирався по максимальному значенні часу відриву пантографа від КП, що вимірювалось експериментально.

Проте, як свідчать випробування експериментальних зразків ТЕП в шахтах, такий спосіб був не тільки неефективним, а і шкідливим, бо, підтримуючи працездатність системи при максимальних відривах пантографа, система не функціонувала при мінімальних та середніх моментах відриву, котрі мають місце значно частіше.

Необхідно створення СК з адресною адаптацією її до кожного факту відриву пантографа, або зниження рівня напруги живлення електровозу.

Мета роботи – побудова ймовірнісної моделі аварійних ситуацій, для оцінки стану системи тягового електропривода електровоза з метою пошуку оптимальних режимів настройки її захисту.

Матеріал і результати дослідження. В процесі руху рудникових електровозів, в силу різних випадкових чинників, виникають ситуації відриву пантографа від контактного дроту системи електричного живлення. Згідно з алгоритмом керування момент початку відриву є сигналом для спрацювання системи захисту ТЕП, яка діє на протязі фіксованого терміну $t_3 = \text{const}$, після чого «ключ» знову автоматично вмикається. В силу того, що тривалість відриву та інтервал між відривами не є постійними, а являють собою випадкові величини відповідно t_1 та t_2 ,

можливо виникнення ситуацій, що умовно представлені на рис. 1.

Очевидно, що безперебійна робота системи ТЕП можлива за виконання умови $t_1 < t_3 < t_2$ (рис. 1, а).

У випадках, коли $t_3 < t_1$, (рис. 1, б)), або $t_3 > t_2$

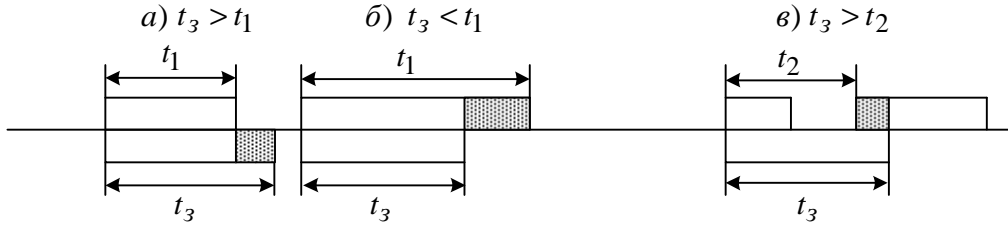


Рисунок 1 – Можливі ситуації при відриві пантографа

Слід зазначити, що події $t_3 < t_1$ та $t_3 > t_2$ несумісні, або мовою алгебри подій: $(t_3 < t_1) \cap (t_3 > t_2) = \emptyset$. Тобто, аварійна ситуація може виникнути виключно за рахунок однієї з цих ситуацій. Таким чином постає задача побудови ймовірнісної моделі аварійних ситуацій, оцінки ймовірностей кожного зі станів системи та пошук оптимальних режимів настройки системи захисту ТЕП електровоза з метою зменшення ймовірностей виникнення аварійних відключень.

Потік ситуацій, коли виникає відрив контакту пантографа, будемо вважати найпростішим з постійною інтенсивністю λ_1 . Потік аварійних відключень також будемо вважати найпростішим з інтенсивністю λ_2 . Очевидно, що $\lambda_2 < \lambda_1$. Обидві потоки можна описати законом розподілу Пуассона. Нехай аналізується проміжок часу t . Тоді ймовірність $k = 0, 1, 2, \dots$ відривів контакту обчислюється за формулою:

$$P1_k(t) = \frac{(\lambda_1 t)^k}{k!} e^{-\lambda_1 t}, \quad (1)$$

а ймовірність аварійного відключення:

$$P2_k(t) = \frac{(\lambda_2 t)^k}{k!} e^{-\lambda_2 t}. \quad (2)$$

Одночасно закон розподілу величин t_1 та t_2 будемо вважати експоненціальним зі щільностями ймовірностей відповідно:

$$f_1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}, & t \geq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$f_2(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}, & t \geq 0 \end{cases}. \quad (4)$$

Маємо наступну повну групу подій:

$$(t_1 < t_3 < t_2) \cup (t_1 > t_3) \cup (t_2 < t_3) = \Omega. \quad (5)$$

Після переходу у простір ймовірностей відповідно до (5) маємо:

- виникає аварійне відключення електромеханічної системи від системи живлення, після чого остання вводиться в робочий стан машиністом у ручному режимі.

$$p(t_1 < t_3 < t_2) + p(t_1 > t_3) + p(t_2 < t_3) = 1. \quad (6)$$

Графіки щільностей розподілу величин t_1 та t_2 та досліджуваних ймовірностей наведені на рис. 2.

Згідно з (6) ймовірність надійної роботи контакту:

$$p(t_1 < t_3 < t_2) = 1 - p(t_1 > t_3) - p(t_2 < t_3). \quad (7)$$

Таким чином, можна сформулювати оптимізаційну задачу у наступному вигляді:

$$U(t_3) = p(t_1 < t_3 < t_2) = 1 - p(t_1 > t_3) - p(t_2 < t_3) \rightarrow \max, \quad (8)$$

за умови $0 < t_3 < t_{гр}$.

Враховуючи, що:

$$p(t_1 > t_3) = \int_{t_3}^{t_{гр}} f_1(x) dx - \int_{t_3}^{t_{гр}} f_2(x) dx, \quad (9)$$

$$p(t_2 < t_3) = \int_0^{t_3} f_2(x) dx, \quad (10)$$

цільова функція набуде вигляду:

$$U(t_3) = 1 - \int_{t_3}^{t_{гр}} f_1(x) dx + \int_{t_3}^{t_{гр}} f_2(x) dx - \int_0^{t_3} f_2(x) dx. \quad (11)$$

Значення $t_{гр}$ знаходимо за умови $f_1(t) = f_2(t)$. У даному випадку як корінь рівняння:

$$\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} = \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}.$$

Маємо:

$$t_{гр} = \frac{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (12)$$

Після проведення обчислень, з (11) отримуємо вираз для цільової функції, її першої та другої похідної:

$$U(t_3) = e^{-\lambda_1 t_{гр}} - e^{-\lambda_2 t_{гр}} - e^{-\lambda_1 t_3} + 2e^{-\lambda_2 t_3} - 1, \quad (13)$$

$$U'(t_3) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_3} - 2\lambda_2 e^{-\lambda_2 t_3}, \quad (14)$$

$$U''(t_3) = -\lambda_1^2 e^{-\lambda_1 t_3} + 2\lambda_2^2 e^{-\lambda_2 t_3}. \quad (15)$$

З розв'язку рівняння

$$U'(t_3) = \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_3} - 2\lambda_2 e^{-\lambda_2 t_3} = 0,$$

знаходимо стаціонарну точку

$$t_3^* = \frac{\ln(2\lambda_2) - \ln \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (16)$$

на відрізку $0 < t_3 < \frac{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}$. Так як $U''(t_3^*) < 0$,

то знайдена точка є точкою максимуму.

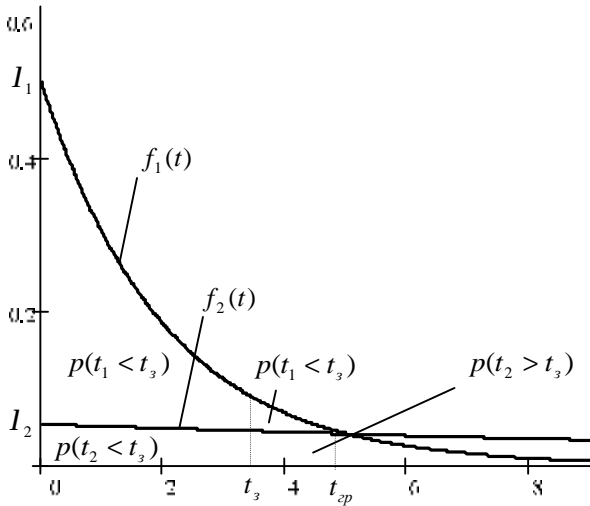


Рисунок 2 – Щільності розподілу величин t_1 та t_2 та досліджувані ймовірності

Таким чином, оптимальне значення настройки часу дії системи захисту залежить і визначається виключно інтенсивностями потоків λ_1 та λ_2 .

Для прикладу зробимо розрахунок оптимального значення настройки системи захисту для наступних емпіричних даних: $\bar{t}_1 = 2$ с – середнє арифметичне значення протяжності терміну відсутності контакту; $\bar{t}_2 = 18,75$ с – середнє арифметичне значення протяжності інтервалу часу між двома відривами (виходячи з 80-ти випадків відривів за 25 хв. руху електровоза). Тоді $\lambda_1 = \frac{1}{\bar{t}_1} = 0,5$, $\lambda_2 = \frac{1}{\bar{t}_2} = 0,053$. Підставляючи дані значення у (12)-(16) отримуємо:

$$t_3^* = 3,459 \text{ с}, t_{TP} = 5,011 \text{ с},$$

$$U(t_3^*) = p(t_1 < t_3 < t_2) = 0,80197.$$

На рис. 3 наведені графіки цільової функції та першої і другої її похідної для даного випадку.

На практиці ми маємо справу не з t_3^* , а з його точковою оцінкою $\tilde{t}_3^* \approx t_3^*$:

$$\tilde{t}_3^* = \frac{\ln(2\tilde{\lambda}_2) - \ln \tilde{\lambda}_1}{\tilde{\lambda}_2 - \tilde{\lambda}_1}, \quad (17)$$

де в якості незміщених і конзистентних оцінок параметрів λ_1 і λ_2 доцільно брати відповідно $\tilde{\lambda}_1 = \frac{1}{\bar{t}_1} = \frac{n_1}{T_1}$, $\tilde{\lambda}_2 = \frac{1}{\bar{t}_2} = \frac{n_2}{T_2}$. Тут \bar{t}_1 , \bar{t}_2 – середні арифметичні інтервали відповідно між відривами та між аварійними відключеннями; n_1, n_2 – кількість відповідних подій протягом інтервалів відповідно T_1, T_2 , с. Якщо допустити, що $\tilde{\lambda}_1$ змінюється несуттєво, тобто, $\tilde{\lambda}_1 \approx \text{const}$, то формулу (17) можна представити як функцію від n_2 :

$$\tilde{t}_3^*(n_2) = \frac{\ln\left(\frac{2n_2}{T_2}\right) - \ln \tilde{\lambda}_1}{\frac{n_2}{T_2} - \tilde{\lambda}_1}. \quad (18)$$

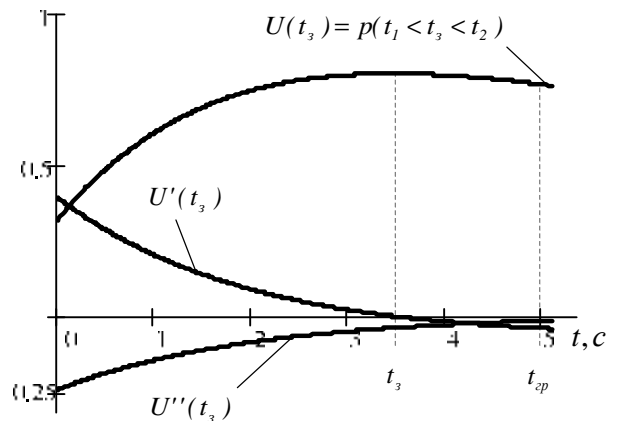


Рисунок 3 – Графіки цільової функції, першої і другої її похідних

На рис. 4 наведено графік залежності (18) при $\tilde{\lambda}_2 = 0,5$, $T = 7$ хв, для $n \in [5; 33]$, що відповідає даним експерименту. Точки на графіку відповідають реальним експериментальним даним (табл. 1-3).

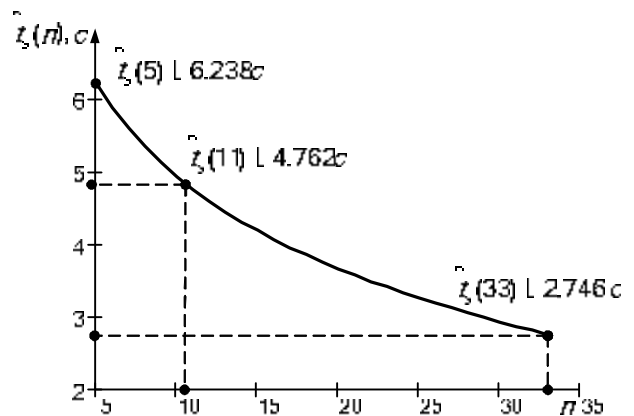


Рисунок 4 – Графік залежності оцінки оптимального значення інтервалу настройки дії системи захисту від кількості відривів

Таблиця 1 – Частотно-часовий емпіричний розподіл частоти відривів. Перший експеримент

Часовий карман, хв.	[0;2]	[2;3]	[3;4]	[4;5]	[5;6]	[6;7]	[7;8]	[8;9]	[9;10]	[10;11]	[11;12]	[12;13]	[13;14]	[14;15]
Частота відривів	1	1	2	0	0	1	0	3	1	0	0	2	0	1

Таблиця 2 – Частотно-часовий емпіричний розподіл частоти відривів. Другий експеримент

Часов. карман, хв.	[0;2]	[2;3]	[3;4]	[4;5]	[5;6]	[6;7]	[7;8]	[8;9]	[9;10]	[10;11]	[11;12]	[12;13]	[13;14]	[14;15]	[15;16]	[16;17]
Частота відривів	3	0	2	0	0	0	0	2	0	0	3	1	3	0	2	0

Таблиця 3 – Частотно-часовий емпіричний розподіл частоти відривів. Третій експеримент

Часовий карман, хв.	[0;2]	[2;3]	[3;4]	[4;5]	[5;6]	[6;7]	[7;8]	[8;9]	[9;10]	[10;11]	[11;12]	[12;13]	[13;14]	[14;15]
Частота відривів	2	4	3	6	3	6	9	6	5	6	6	2	1	0

Як видно з даних експерименту, кількість відривів коливається в досить широких межах, що, в свою чергу, викликає значиму варіацію значень оптимального часу дії захисту системи електричного привода для забезпечення максимальної надійності безперебійної роботи контакту. Виходячи з цього, логічним є висновок щодо синтезу адаптивної системи захисту на основі закону (18).

Висновки. На основі досліджень механізму виникнення збоїв в електроживленні і виникнення аварійних ситуацій в системі тягового електроприводу рудникових електровозів отримана і досліджена модель вірогідності аварійних ситуацій яка дозволяє виконати синтез функції надійності системи. Доведено змінний характер оптимально необхідного режиму налагодження системи захистів тягового електроприводу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Азарян А.А., Вілкул Ю.Г., Капленко Ю.П., Караманець Ф.І. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих технологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв. – Кривий Ріг.: Мінерал, 2006. – 219 с.
2. Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышев А.Л., Синчук И.О., Удовенко О.А., Пасько О.В., Гузов Э.С. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / Под ред. доктора техн. наук О.Н. Синчука. Научное издание. НАН Украины. Институт электродинамики. – К. – 2006. – 250 с.

Стаття надійшла 19.04.2008 р.