Годишник на Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски"
том 44-45, свитък III, Механизация, електрификация и автоматизация на мините, София, 2002, стр. 63-66

МАТЕМАТИЧНИ МОДЕЛИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА РУДНИЧНИ СИСТЕМИ ЗА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ

Евтим Кърцелин

Минно-геоложки университет
"Св. Иван Рилски"
София 1700, България

РЕЗЮМЕ
В доклада са представени различни по сложност и възможности марковски модели за изследване на руднични системи за електроснабдяване и обзавеждане.

Ключови думи: марковски модели, електроснабдяване, надеждност, безопасност.

ВЪВЕДЕНИЕ

Създаването на абсолютно надеждни и безопасни технически системи е непостижима задача. Създаването на технически системи със зададено ниво на надеждност и безопасност е една реална и актуална задача. Особено остро стои въпросът за разработването на адекватни на съответна техническа система математически модели, въз основа на които е възможно теоретично да се обоснове и избере най-правилния път за реализирането на система при зададени показатели за надеждност и безопасност.

Тази задача е особено актуална и за рудничните системи за електроснабдяване и обзавеждане, свързано с необходимостта за количествено определяне на риска при използването на електроенергията в подземните въглищни рудници.

В доклада са представени различни по сложност марковски модели на руднична система за електроснабдяване и електрообзавеждане. Показани са техните възможности за анализ и оценка влиянието на отделни параметри върху общите показатели на системата за надеждност и безопасност.

МОДЕЛ ЗА ДВЕ СЪСТОЯНИЯ НА РУДНИЧНАТА СИСТЕМА ЗА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ

Рудничната система за електроснабдяване (РСЕ) е възможно да се намира в едно от двете състояния – безопасно и опасно. Под безопасно състояние следва да се разбира такова състояние на РСЕ, при което се изпълняват всички изисквания на действащите нормативно-технически документи (*Правилник по безопасността…, 1992; Правилник за устройство …, 1987*). Състояние, при което не се изпълнява дори и едно от тези изисквания, системата става опасна.

Първото състояние (безопасно), ще се означава с 0 (нула), а второто състояние (опасно) – с 1 (единица).

За формализация на процеса за функциониране на РСЕЕ се приемат следните допускания.

Вероятността за появата в произволен интервал от време Δt на един или друг брой събития, в резултат на които РСЕ преминава от едно състояние в друго, не зависи от това, какъв брой събития са възникнали на други интервали от време, които не се пресичат с разглеждания, т.е. не зависи от състоянието на РСЕ в предшестващите моменти от време, което се явява характерна черта за марковски процес.

Вероятността за това, че за определен интервал от време Δt РСЕ ще извърши два и повече прехода, се приема за безкрайно малка величина от по – висок порядък в сравнение с вероятността РСЕ за същия интервал от време да извърши един преход. Вероятността за появата на един или друг брой събития, в резултат на което РСЕ преминава от състояние в състояние, на участък от време с дължина τ зависи само от дължината на участъка.

На основата на посочените свойства потокът събития, които променя системата от едно състояние в друго, се явява пуасонов, а процесът, протичащ в система с дискретни състояния и непрекъснат във времето, се явява марковски процес.

При марковски процес за функциониране на РСЕ се приема, че отказите които възникват, се подчиняват на експоненциален закон на разпределение. Времето за възстановяване работоспособното (безопасно) състояние на РСЕ също се приема с експоненциален закон на разпределение, което се потвърждава от многобройни изследвания.

За определяне на вероятностите за безопасното $P_0(t)$ и опасното $P_1(t)$ състояние на РСЕ в произволен момент от време t се съставя следната системата диференциални уравнения, описваща вероятностните състояния на дискретна система с две състояния, в която протича марковски процес, непрекъснат във времето

$$\left.\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{at} &= -\lambda_{01}P_0(t) + \lambda_{10}P_1(t) \\ \frac{dP_1(t)}{at} &= -\lambda_{10}P_1(t) + \lambda_{01}P_0(t) \end{aligned}\right| \qquad (1)$$

За всеки момент от времето t е в сила условието

$$P_0(t) + P_1(t) = 1 \qquad (2)$$

Системата (1) при началните условия $P_0(0)=1$, $P_1(0)=0$ и при изпълнение на условието (2) има следното решение

$$P_0(t) = \frac{\lambda_{10}}{\lambda_{10} + \lambda_{01}}\left[1 + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10}}\ell^{-(\lambda_{01}+\lambda_{10})t}\right] \qquad (3)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{10}}\left[1 - \ell^{-(\lambda_{01}+\lambda_{10})t}\right] \qquad (4)$$

По такъв начин, допускането за марковския характер на процеса за функциониране на РСЕ, позволява сравнително просто да се получават зависимости между вероятността за безопасно състояние $P_0(t)$ на РСЕ от нейните параметри за надежност (параметър на потока за опасни откази λ_{01} и интензивност на възстановяване λ_{10}), което позволява в първо приближаване да се проанализират най-ефектните пътища за повишаване безопастността на системата.

Целесъобразността на допускането за протичането на марковски процеси при функционирането на РСЕ се потвърждава от следните две обстоятелства. На първо място, това са резултатите от многобройните изследвания, които потвърждават експоненциалния закон за разпределения на наработката между отказите и времето за възстановяване на системата РСЕ, което се явява необходимо и достатъчно условие за съществуването на еднородни (пуасонови) потоци, а следователно и марковски процес с дискретен краен брой състояния и непрекъснат във времето (*Макаров, 1990*).

На второ място, в по-голяма част от задачите с приложен характер замяната на непуасонови потоци събития с пуасонови при една и съща интензивност води до получаването на решения, които сравнително малко се отличават от действителните. При това, получената грешка по правило се намира в границите на точност на изходните данни, които най-често също са известни твърде приближено (*Овчаров, 1969*).

Поставя се задачата за анализ на израза (3) с цел да се установят зависимости между вероятността за безопасно състояние на РСЕ от коефициента за опасност K_0, а също така и за изясняване продължителността на интервала от време t_c, след който се установява стационарна стойност на $P_0(t)$, независеща от времето. Тази стационарна стойност $[P_0(\infty)=K_Б]$ представлява по същество тази постоянната стационарна вероятност, с която РСЕ ще се намира в безопасно състояние във всеки момент от времето t след t_c.

Условието за стационарност на $P_0(t)$ позволява съществено да се опрости решението на диференциалните уравнения, описващи вероятностните състояния, заменяйки ги с алгебрични уравнения, което е важно за понататъшните аналитични изследвания за безопасност на РСЕ, когато броят на разглежданите състояния е по – голям от две.

Уравнението (3) може да се запише в следния вид:

$$P_0(t) = \frac{1}{1 + K_0}\left[1 + K_0\ell^{-(\lambda_{01}+\lambda_{10})t}\right] \qquad (5)$$

където K_0 – се нарича коефициент на опасност, T_0 – средна наработка до опасен отказ, T_y – средно време за намиране на системата в опасно състояние (средна продължителност на опасно състояние) λ_{01} – параметър на опасните откази; λ_{10} – интензивност за възстановяване на безопасното състояние (интензивност за отстраняване на опасните откази)

Коефициента на опасност K_0 се определя с израза

$$K_0 = \frac{T_y}{T_0} = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10}} \qquad (6)$$

От получените зависимости е възможно да се направят следните важни изводи:

1. Продължителността на интервала от време t_c, в границите на който се установява стационарна стойност на вероятността за безопасна работа на системата, т.е. $P_0(t)=P_0(\infty)$, за РСЕ не е голяма и е от порядъка на 12 часа, което с отчитане на фактическия ресурс, определян на години, позволява да се изключи предходния процес при анализ състоянието на РСЕ, т.е. да се разглежда състоянието на системата от момента $t>t_c$.

При стационарен процес

$$P_0(t) = P_0(\infty) = K_S = \frac{1}{1 + K_0} \qquad (7)$$

2. С увеличаване стойността на коефициента K_0 вероятността за безопасно състояние рязко се намалява. Ето защо е възможно да се постигне високо ниво на безопасност както за сметка на

повишаване на надеждността, като се повишава наработката до опасен отказ T_0, но и като се намалява времето за отстраняване на опасен отказ T_y, а също така и за сметка на изпълнение на условията

$$K_0 = \frac{T_y}{T_0} = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10}} << 1 \qquad (8)$$

Даже и при ниска изходна надеждност

2. За получаването на малка стойност на коефициента на опасност K_0 по условието (6) е възможно да се подходи по два начина: чрез увеличаване на T_0 или чрез намаляване на T_y. Световният опит в това направление показва, че е значително по – евтино, сравнително по – просто и по – ефективно да се използва втори път, като съществено се повишава ремонтопригодността на електрообзавеждането в РСЕ а също така и чрез автоматично включване на разреза (АВР), когато вместо отказалия елемент в системата практически мигновено се въвежда нов елемент, посредством телемеханично управление на високоволтови взривозащитени КРУ, използване на вградени и преносими устройства за диагностика, използване на алгоритми за търсене на опасни откази и т.н.

Към изложеното до тук следва да се добави и изискването за определено съответствие между величините T_0 и T_y: колко е по – малко T_0, толкова по – голямо следва да бъде T_y или с други думи – колко по – лоша е безотказността, толкова по – добра следва да бъде ремонтопригодността.

3. При зададено ниво на безопастност е възможно да се определят нормативни изисквания към надеждността на РСЕЕ. За тази цел използвайки уравнение (5) с отчитане на зависимостта на коефициента за опасност по (6). задавайки необходимото ниво за безопастност, се определят едновременно изискванията и към двата показателя T_0 и T_y, които се намират в строго съответствие помежду си. При това се получават множество двойки стойности T_0 и T_y, което позволява да се намери най-ефективното решение за достигане на зададеното ниво за безопастност – или за сметка на повишаване на безотказността, или за сметка на подобряване на ремонтопригодността.

МОДЕЛ С ТРИ СЪСТОЯНИЯ, ПРИЛОЖИМ ЗА РУДНИЧНА КАБЕЛНА МРЕЖА

За осигуряване на безопасно и безаварийно електроснабдяване на подземните рудници се определят твърде големи изисквания към рудничната кабелна мрежа. На безопасността и безаварийността оказват влияние такива параметри на кабелите, каквито са изолационното съпротивление и съпротивлението на екрана, а също така и стойността на предходните съпротивления в местата за свързване на кабела с електроконсуматорите и електрическите апарати за управление. Големината на изолационното съпротивление оказва съществено влияние както върху възможността за поражения на човека от електрически ток, така и върху възможността за възникване на пожари.

Големината на посочените параметри за рудничните кабели по правило е нормирана. Ако тези величини удовлетворяват определените норми, то кабелът ще се намира в безопасно състояние, в противен случай - в опасно.

По такъв начин за кабелите, от гледна точка на изискванията за безопасност и надеждност на функциониране са характерни следните три състояния:

I. Безопасно работоспособно, при което кабелът удовлетворява всички изисквания на нормативно – техническата документация (НТД) по отношение стойността на посочените по горе параметри и е способен да осигури електроснабдяване на консуматорите в подземния рудник (състояние 1);

II. Опасно работоспособно, при което стойността на един или няколко от посочените по-горе параметри неудовлетворяват изискванията, определени с НТД, но кабелът е в състояние да осигурява електроснабдяване на потребителите (състояние 2);

III. Безопасно неработоспособно, при което кабела е изключен (състояние 3).

По такъв начин, за разлика от РСЕ, рудничните кабели могат да се намират в едно от трите състояния (състоянието опасно неработоспособно за тях се изключва).

Потокът събития, който превежда кабелите от 1-во във 2-ро състояние, се явява поток на опасни частични откази, при които не се нарушава технологичната функция на кабела, но параметрите, влияещи на безопасността, неудовлетворяват допустимите норми. Интензивността на този поток събития е равна на $\lambda_{12}=T_1^{-1}$, където T_1 – средна наработка на частичен опасен отказ.

Рудничните кабели е възможно да преминат от 2-ро в 1-во състояние преди всичко чрез 3-то състояние (след изключване на кабела и отстраняване на причините за частичен отказ), но могат понякога да преминат в състояние 1 при увеличаване съпротивлението на изолацията в резултат на сушенето на кабела от топлината, която се отделя при протичането на работния ток (интензивността на този преход се означава с λ_{21})

Потокът събития, в резултат на който кабелът преминава от 2-ро в 3-то състояние с интензивност λ_{23} се явява потокът за изключване на кабела при частични опасни откази от автоматичната защита или от обслужващия персонал. Интензивността на този преход е равна на $\lambda_{23}=T_2^{-1}$, където T_2 – това е средното време от момента на възникването на частичен опасен отказ до момента на изключването на кабела. Приема се, че в състояние 3 частичния опасен отказ ще бъде отстранен. По тази причина прехода от 3-то във 2-ро състояние е невъзможен. От 3-то състояние е възможен само прехода в 1-во състояние с интензивност $\lambda_{31}=T_3^{-1}$, където T_3 – средно време за отстраняване на пълни и частични откази на кабела.

Преходът от 1-о в 3-то състояние е в резултат на настъпването на пълни откази, свързани с нарушаване на технологичната функция на рудничния кабел (електроснабдяване на подземни консуматори), водещо до сработване на съответната защита и изключване на кабела. Интензивността на този преход е равна на $\lambda_{13}=T_4^{-1}$, където T_4 е средната наработка на пълен отказ.

Такава система с три състояния се описва със следната система диференциални уравнения

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = -(\lambda_{13} + \lambda_{12})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) \\ \frac{dP_2}{dt} = -(\lambda_{23} + \lambda_{21})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) \\ \frac{dP_3}{dt} = \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - \lambda_{31}P_3(t) \end{cases} \tag{9}$$

На системата (9) съответствува следното нормирано условие

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1 \tag{10}$$

Началните условия имат следния вид:

$$P_1(0) = 1, \quad P_2(0) = P_3(0) = 0 \tag{11}$$

При стационарен процес системата уравнения (9) има следното представяне

$$\begin{cases} -(\lambda_{13} + \lambda_{12})P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 = 0 \\ -(\lambda_{23} + \lambda_{21})P_2 + \lambda_{12}P_1 = 0 \\ \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3 = 0 \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1 \end{cases} \tag{12}$$

Вероятността кабелът да се намира в състояние 2 (опасно работоспособно) се определя по следния израз

$$P_2 = \frac{\lambda_{31}\lambda_{12}}{(\lambda_{13} + \lambda_{31})(\lambda_{23} + \lambda_{21}) + (\lambda_{23} + \lambda_{31})\lambda_{12}} \tag{13}$$

Анализът на израза (13) в зависимост от числените стойности на величините показва, че вероятността на опасното състояние най–съществено зависи от отношението $\lambda_{12} / \lambda_{23}$.

По такъв начин, за повишаване на безопасната експлоатация на рудничните кабели е необходимо, от една страна, да се повишава безотказността на кабелите за сметка на намаляване параметъра на потока на частичните опасни откази; от друга страна, намаляване на времето от момента на възникване на частичен опасен отказ до момента на изключване на кабела, например от автоматичната защита, която не позволява да се експлоатира кабел с ниско изолационно съпротивление.

Зависимостта (13) позволява да се установи нормативно ниво за безотказност на рудничните кабели по отношение на частични опасни откази в зависимост от ефективността на техническите средства за откриване на тези откази при зададено ниво на безопасност.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Използвайки марковските процеси за функциониране на РСЕЕ за две, три и повече състояния е възможно сравнително просто да се получат зависимости между вероятността за безопасно състояние и надеждностни параметри, както и да се проанализират най-ефективните пътища за повишаване на безопасността. Значително се опростява анализа като се изключи преходния процес за функциониране на РСЕЕ.

ЛИТЕРАТУРА

Заренин Ю.Г. и др. 1975. Надежность и эфективность АСУ. Теххника, Киев.

Макаров М.И., Кърцелин Е.Р. 1996. Надежность шахтных подъемных установок. Донецк.

Макаров М.И. 1990. Развитие теоретических основ расчета и обеспечение безаварийности функционирования электрооборудования и систем електроснабжения подземных разработок угольных шахт. Автореферат дис.....доктора техн. наук, Донецк.

Овчаров Л.А. 1969. Прикладные задачи теории массового обслуживания. М., Машиностроение.

Правилник по безопасността на труда в подземните въглищни рудници (В-01-01-01), София, 1992, Том 1 и 2.

Правилник за устройство на електрическите уредби. Теххника, С., 1987.

Тараканов К.В. и др. 1974. Аналитические методы исследования систем, М., Советское радио.

Препоръчана за публикуване от катедра
“Електрификация на минното производство” на МЕМФ

MATHEMATICAL MODELS FOR INVESTIGATING MINE POWER SYSTEMS

Evtim Kartselin

University of Mining and Geology
"St. Ivan Rilski"
Sofia 1700, Bulgaria

ABSTRACT
This report presents Markovian models of various complexity and capabilities intended for the investigation of mine power systems.
Keywords: Markovian models, power supply, reliability, safety.

INTRODUCTION

Creating absolutely reliable and safe technical systems is an unrealizable task. However, creating technical systems with a pre-set level of reliability and safety is a real and important task. Especially critical is the problem of developing mathematical models adequate to a corresponding technical system, based on which it would be possible to substantiate theoretically and select the most correct path of realizing a system with pre-set indices of reliability and safety.

This task is of special critical importance for mine power systems in connection with the necessity of quantitatively defining the risks in utilizing the electrical power in underground coal mines.

Markovian models of various complexity presented in this report are used for a mine power supply system. Their capabilities of analyzing and estimating the impact of individual parameters on general indices of the reliability and safety system are shown.

TWO-STATE MODEL OF THE MINE POWER SYSTEM

The mine power system (MPS) can be in one of two states: safe or dangerous [Makarov, 1990, 1996]. The term "safe state" shall be understood as such a state of MPS at which all requirements of the effective normative and technical documents are being met [Regulations-1967; Regulations-1992]. If the system is in a state at which just one of those requirements is not met, it should be considered "dangerous".

The first state (the safe one) will be denoted by 0 (zero), and the second (dangerous) state by 1 (one).

To formalize the MPS functioning process the following assumptions are made.

The probability of occurrence of one or another number of events during an arbitrary time interval Δt, in result of which MPS is transferred from one state into another, does not depend on what number of events have occurred for other time intervals not crossing that in question, i. e. it does not depend on the state of MPS in previous time instants, and this is a characteristic trait of Markovian processes.

The probability that for a given time interval Δt MPS will make two or more transitions is assumed to be an infinitesimal of order higher than that of the probability MPS will make one transition for the same time interval. The probability of occurrence of one or another number of events for a time segment of length τ, depends on the segment length only.

Based on the properties indicated above the flow of events that turns over the system from one state into another will be a Poisson's flow, and the process taking place in a system of discrete states and being continuous in time will be a Markovian process.

For a Markovian process of MPS functioning it is assumed that the occurring failures follow an exponential distribution law. The time for restoring the operable (safe) state of MPS are assumed to have an exponential law of distribution, which is confirmed by multiple investigations.

To determine the probabilities of safe and dangerous MPS states ($P_0(t)$ and $P_1(t)$, respectively) in an arbitrary instant of time t the following set of differential equations is composed. It describes the stochastic states of a discrete system of two states, in which a Markovian process, being continuous in time, takes place.

$$\left.\begin{aligned} \frac{aP_0(t)}{at} &= -\lambda_{01}P_0(t) + \lambda_{10}P_1(t) \\ \frac{aP_1(t)}{at} &= -\lambda_{10}P_1(t) + \lambda_{01}P_0(t) \end{aligned}\right| \qquad (1)$$

For every instant of time t the condition

$$P_0(t) + P_1(t) = 1 \qquad (2)$$

is valid.

Set (1) under initial conditions $P_0(0) = 1$ and $P_1(0) = 0$, and if condition (2) is met, will have the following solution

$$P_0(t) = \frac{\lambda_{10}}{\lambda_{10} + \lambda_{01}}\left[1 + \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10}}\ell^{-(\lambda_{01}+\lambda_{10})t}\right] \qquad (3)$$

$$P_1(t) = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda_{10}}\left[1 - \ell^{-(\lambda_{01}+\lambda_{10})t}\right] \qquad (4)$$

In such a way the assumption for a Markovian character of the MPS functioning process enables the relatively simple way of obtaining relationships between the probability for a safe state $P_0(t)$ of MPS and its reliability parameters (a flow parameter of dangerous failures λ_{01} and restoration intensity λ_{10}), which allows to perform, as a first approximation, an analysis of the most effective paths to system safety improvement.

The advisability of the assumption for Markovian processes taking places in MPS functioning is confirmed by the following two circumstances. In the first place, these are the results from multiple investigations confirming the exponential distribution law for the operational period between failures and the time for MPS restoration, which is a necessary and sufficient condition for the existence of homogeneous (Poisson's) flows, and hence of a Markovian process having discrete final number of states and being continuous in time [Makarov, 1990].

In the second place, for most of the problems of applied nature the replacement of non-Poisson's flows of events by Poisson's flows of the same intensity leads to obtaining solutions which differ relatively little from the actual ones. Moreover, the error obtained is in principle within the accuracy limits of the initial data which also are most often known rather approximately. [Ovcharov,1969]

It is proposed to analyze expression (3) with the purpose of finding relationships between the probability for a safe state of MPS and the coefficient of danger K_0 as well as of clarifying the duration of time interval t_c after which a stationary value of $P_0(t)$, not depending on time, is established. In essence, this stationary value of $[P_0(\infty) = K_S]$ is that constant stationary probability with which MPS will be in a safe state at every instant of time t after t_c.

The condition of stationarity of $P_0(t)$ allows to simplify considerably the solution of differential equations which describe the stochastic states by replacing them with algebraic equations. This is important for the further analytical investigations regarding the safety of MRS in cases where the number of states considered is higher than two.

Equation (3) can be written in the following form:

$$P_0(t) = \frac{1}{1 + K_0}\left[1 + K_0\ell^{-(\lambda_{01}+\lambda_{10})t}\right] \qquad (5)$$

where K_0 is called coefficient of danger, T_0 average operational period to a dangerous failure, T_y average period for which the system is in a dangerous state (average duration of the dangerous state), λ_{01} parameter of dangerous failures, λ_{10} intensity of restoring the safe state (intensity of eliminating the dangerous failures).

The coefficient of danger K_0 is determined by the expression

$$K_0 = \frac{T_y}{T_0} = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10}} \qquad (6)$$

The following important conclusions can be derived from the relationships obtained:

1. The duration of time interval t_c within which a stationary probability value for system's safe operation is established, i. e. $P_0(t) = P_0(\infty)$ for MPS, is not great and in fact it is of the order of 12 hours. Taking into account the actual resource, this allows to eliminate the transition process in analyzing the state of MPS, i. e. to consider the system state after the time $t > t_c$.

In a stationary process

$$P_0(t) = P_0(\infty) = K_S = \frac{1}{1 + K_0} \qquad (7)$$

2. With the increase of the value of coefficient K_0 the probability of a safe state is abruptly diminished. That is why it is possible to attain a high level of safety not only at the expense of increasing the safety by realizing a longer operational period to a dangerous failure T_a and by decreasing the time for eliminating a dangerous failure T_y, but also at the expense of fulfilling the conditions

$$K_0 = \frac{T_y}{T_0} = \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{10}} << 1 \qquad (8)$$

Even for a low initial reliability.

3. To obtain a small value of the coefficient of danger K_0 in accordance with condition (6) it is possible to apply two approaches: by increasing T_0 or by diminishing T_y. The world experience gained in this field shows that it is connected with considerably lower costs, and is also relatively simpler and more effective to use for a second time, by considerably increasing the maintainability of the electric equipment in MPS as well as by automatic turning on of the section (ATS), when a new element is virtually immediately put into operation instead of the failed system element, by the telemechanical control of high-voltage explosion-proof switchgears, by the use of built-in or mobile diagnostic devices, by applying search algorithms for dangerous failures, etc.

To the presentation made so far it should be also added the requirement for a certain correspondence between the values of T_0 and T_y: the smaller T_0, the greater T_y should be, or in other words: the worse the failure-free operation, the better the maintainability should be.

4. For a pre-set level of safety it is possible to define normative requirements for the reliability of MPS. For this purpose, by using equation (5) with taking into account the dependence of the coefficient of danger in accordance

with (6), and pre-setting the necessary level of safety, the requirements for both indices T_0 and T_y being in strict correspondence to each other shall be simultaneously determined. In such a way multiple couples of the values of T_0 and T_y are obtained, which allows to find the most effective solution for attaining the pre-set level of safety: either at the expense of improving the safety, or at the expense of improving the maintainability.

THREE-STATE MODEL APPLICABLE TO A MINE CABLE NETWORK

To ensure a safe and failure-free electric power supply to the underground mines very severe requirements are defined for the mine cable network. Such cable parameters as the insulation and shield resistances as well as the value of transitional resistances in places of connecting the cable to electric power consumers and electric control apparatuses. The value of insulation resistance not only effects an essential influence on the risks of human-injuring accidents caused by electric current, but also on the possibility of fire occurrence.

In principle the values of parameters indicated are subject to normalization. If these values do meet the determinate norms the cable will be in a safe state. If not, it will be in a dangerous state.

Thus, from the viewpoint of the requirements for a safe and reliable functionality the following three states are characteristic for the cables:
I). A safe operable state, where the cable meets all requirements of the normative and technical documentation (NTD) regarding the values of parameters given above and is capable to provide electric power to consumers in the underground mine (state 1).
II). A dangerous operable state, where the values of one or several of the parameters given above do not meet the requirements defined by NTD, but the cable is in position to provide electric power to consumers (state 2).
III). A safe inoperable state, where the cable is turned off (state 3).

In such a way, in contrast to MPS, the mine cables can be in one of the three states (for them the dangerous inoperable state is excluded).

The flow of events that transfers the cables from the 1st state into the 3rd one is a flow of dangerous partial failures at which the cable's technological function is not disturbed, but the parameters influencing the safety do not meet the admissible norms. The intensity of this flow of events is equal to $\lambda_{12} = T_1^{-1}$, where T_1 is the average operational period of a partial dangerous failure.

Mine cables can pass from the 2nd state into the 1st one primarily through the 3rd state (upon switching off the cable and eliminating the causes for a partial failure). However, sometimes they can go into state 1 with increasing the insulation resistance as a result of cable drying by the heat generated by the working current (the intensity of this transition is denoted by λ_{21}).

The flow of events in resulting of which the cable performs a transition between the 2nd and 3rd states with intensity λ_{23} is the flow for switching off the cable by the automatic protection or operational personnel when partial dangerous failures occur. The intensity of this transition is equal to $\lambda_{23} = T_2^{-1}$, where T_2 is the average period from the occurrence of a partial dangerous failure to the instant of switching off the cable. It is assumed that the partial dangerous failure will be eliminated in state 3. For this reason the transition from the 3rd state into the 2nd one is impossible. From the 3rd state only a transition to the 1st state is possible with intensity $\lambda_{31} = T_3^{-1}$, where T_3 is the average period of eliminating complete and partial cable failures.

The transition between the 1st and 3rd states results from the occurrence of complete failures connected with disturbing the technological function of the mine cable (supplying power to underground consumers), which leads to actuating the corresponding protection devices and switching off the cable. The intensity of this transition is equal to $\lambda_{13} = T_4^{-1}$, where T_4 is the average operational period at a complete failure.

Such a system of three states is described by the following set of differential equations

$$\begin{cases} \dfrac{aP_1}{at} = -(\lambda_{13} + \lambda_{12})P_1(t) + \lambda_{21}P_2(t) + \lambda_{31}P_3(t) \\ \dfrac{aP_2}{at} = -(\lambda_{23} + \lambda_{21})P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t) \\ \dfrac{aP_3}{at} = \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t) - \lambda_{31}P_3(t) \end{cases} \tag{9}$$

The following normalized condition corresponds to equation set (9):

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) = 1 \tag{10}$$

The initial conditions have the following appearance:

$$P_1(0) = 1, \quad P_2(0) = P_3(0) = 0 \tag{11}$$

In a stationary process the set of equations (9) will be in the following form:

$$\begin{cases} -(\lambda_{13} + \lambda_{12})P_1 + \lambda_{21}P_2 + \lambda_{31}P_3 = 0 \\ -(\lambda_{23} + \lambda_{21})P_2 + \lambda_{12}P_1 = 0 \\ \lambda_{13}P_1 + \lambda_{23}P_2 - \lambda_{31}P_3 = 0 \\ P_1 + P_2 + P_3 = 1 \end{cases} \tag{12}$$

The probability for the cable to be in state 2 (dangerous operable state) is determined according to the following expression:

$$P_2 = \frac{\lambda_{31}\lambda_{12}}{(\lambda_{13} + \lambda_{31})(\lambda_{23} + \lambda_{21}) + (\lambda_{23} + \lambda_{31})\lambda_{12}} \tag{13}$$

Analyzing expression (13) in accordance with the numerical values of quantities shows that the probability of dangerous state most essentially depends on ratio $\lambda_{12}/\lambda_{23}$.

In such a way, to improve the degree of safe operation of mine cables requires, on one hand, an improvement in the failure-free work of cables at the expense of decreasing the parameter of partial dangerous failure flow, and on the other hand, a decrease in the period from the time of partial dangerous failure occurrence to the time of switching of the cable, e. g. by the automatic protection not allowing the operation of a cable of low insulation resistance.

The relationship (13) allows to establish a normative safety level for mine cables in respect to partial dangerous failures depending on the effectiveness of technical means for detecting those failures at a pre-set safety level.

CONCLUSION

Using Markovian processes of MPS functioning for two, three, or more states, it is possible to obtain, in a relatively simple manner, relationships between the safe state probability and the reliability parameters as well as to perform an analysis of the most effective ways of safety improvement. Eliminating the transition process of MPS functioning makes the analysis much simpler.

REFERENCES

Makarov M. I. 1990. Development of the Theoretical Principles of Calculating and Providing Operational Safety for the Electrical Equipment and Power Supply Systems of Underground Coal-Mine Shafts. Author's Report on a Doctor of Technical Sciences Dissertation Thesis, Donetsk.

Makarov M. I., Kartselin E. R. 1996. Reliability of Shaft Hoisting Equipment. Donetsk.

Ovcharov L. A. 1969. Applied Problems of the Theory of Waiting Lines. Moscow, Mashinostroeniye.

Regulations for Installing Electrical Systems. 1967. Sofia, Tekhnika

Regulations for Labour Safety in Underground Coal Mines 1992. (B-01-01-01), Vol. 1 and 2, Sofia.

Tarakanov K. V. et al. 1974. Analytical Methods of System Investigation. Moscow, Sovetskoe Radio.

Zarenin Yu. G. et al. 1975. Reliability and Effectiveness of Automatic Control Systems. Kiev, Tekhnika.

Recommended for publication by Department of Mine Electrification, Faculty of Mining Electromechanics