

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ШАХТНОЙ ПОДЪЁМНОЙ УСТАНОВКИ

Серезентинов Г.В. к.т.н., доц., Варников С.А., инженер,
Донецкий государственный технический университет

Приведены показатели надёжности основных элементов системы электропривода шахтной подъёмной установки (ШПУ). Предложены алгоритмы моделирования непрерывных случайных величин параметров режимов работы ШПУ. Разработаны принципы создания автоматизированной системы управления надёжностью ШПУ.

The parameters of dependability of basic elements of system of the electric drive of mine elevating installation (MEI) are given. The algorithms of modeling of continuous casual sizes of parameters of modes of operations MEI are offered. The principles of creation of the automated control system dependability MEI is developed.

Шахтная подъёмная установка – одна из наиболее сложных и ответственных электроустановок, от ритмичной и безотказной работы которой существенно зависят показатели эффективности горного предприятия.

Значительная глубина ствола, увеличение количества действующих горизонтов значительно усложняет процесс функционирования ШПУ. Это приводит к увеличению числа отказов электрической и ускоренному износу механической частей ШПУ [1]. Поэтому вопросы повышения надёжности ШПУ являются весьма актуальными.

Значительный вклад в исследования эксплуатационной надёжности электрооборудования выполнены проф. Макаровым М.И. [1]. При этом под критерием отказа подъёмной установки понимается событие, заключающееся в прекращении функционирования, вследствие невыполнения отдельными элементами заданных функций.

Поэтому было принято, что с точки зрения надёжности все элементы ШПУ, включенные в состав структурно-логической схемы расчета безотказности соединены последовательно. Вероятность же безотказной работы системы в интервале $(0, t)$ на основании теоремы умножения независимых событий равна произведению вероятности безотказной работы всех элементов [2].

$$R_c(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t).$$

Определительные испытания на надежность позволили классифицировать и количественно оценить причины возникновения отказов ШПУ - таблица 1.

Таблица 1- Классификация причин возникновения отказов

Наименование элементов	Причины возникновения отказов, %		
	конструкт.	производств.	эксплуатац.
<u>Механическая часть:</u>			
-интервал;	6,9...50	1,6...85,4	14,6...80,4
-мат. ожидание;	12,0	21,6	61,2
-стандарт;	15,7	27,3	26,2
<u>Электрич. часть:</u>			
-интервал;	7,4...49,3	6,3...29,5	7,3...92,6
-мат. ожидание;	28,8	23,1	54,3
-стандарт;	15,4	15,0	23,6
<u>ШПУ в целом:</u>			
-интервал;	3,7...25,6	2,0...29,7	5,7...44,7
-мат. ожидание;	20,3	22,2	57,5
-стандарт;	25,2	34,3	40,5

Данные таблицы 1 свидетельствуют о том, что большую часть причин возникновения отказов составляют эксплуатационные – 57,5%, а их мера рассеивания – 40,5%. При этом эксплуатационные в 2,6...2,8 раза больше прочих причин возникновения отказов.

Следует отметить, что на шахтах угольной промышленности эксплуатируются ШПУ с ручным и автоматизированным управлением. Процесс функционирования последних является более щадящим с точки зрения времени нахождения во включенном состоянии. Максимальная продолжительность движения подъемного сосуда (ПС) при ручном управлении составляет 82% времени рабочего цикла, при автоматизированном – 79%, а доверительные границы времени движения ПС соответственно $99,4 < 101,1 < 102,8$ и $79,8 < 80,3 < 80,8$ с.

Исследованиями надежности, в том числе в Донецком (Украина), Карагандинском и Подмосковном (Россия) [3] установлены регрессионные зависимости между параметром потока отказов и режимами работы электрооборудования. Поэтому для ШПУ с помощью метода моментов определены оценки параметров, а посредством статистического критерия согласия χ^2 -Пирсона - подтверждена сходи-

мость эмпирических данных с теоретической плотностью распределения вероятности следующих показателей режимов работы:

• коэффициента нагрузки электродвигателя (ЭД) ШПУ (нормальное распределение):

$$\left. \begin{aligned} f(k_n) &= \frac{1}{0,19\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(k_n - 0,925)^2}{0,0722}, \\ f(k_n) &= \frac{1}{0,15\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(k_n - 0,885)^2}{0,045}, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{- скиповой,} \\ \text{- клетьевой,} \end{array}$$

• продолжительности времени технологической паузы ШПУ (логарифмически-нормальное распределение)

$$\left. \begin{aligned} f(t_n) &= \frac{1}{t_n 0,215\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(Ln t_n - 1,28)^2}{0,0928}, \\ f(t_n) &= \frac{1}{t_n 0,092\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(Ln t_n - 1,455)^2}{0,0168}, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{- скип. с ручным управлением,} \\ \text{- клетьевой, грузо-людской,} \end{array}$$

• продолжительность времени движения ШПУ в течение цикла (нормальное распределение);

$$\left. \begin{aligned} f(t_d) &= \frac{1}{11,4\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(t_d - 101,1)^2}{260}, \\ f(t_d) &= \frac{1}{3,6\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(t_d - 80,35)^2}{26}, \\ f(t_d) &= \frac{1}{8,5\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(t_d - 123,3)^2}{144,4}, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{- скиповой с ручным управлением,} \\ \text{- скип. с автоматизир. управлением,} \\ \text{- клетьевой, грузо-людской,} \end{array}$$

• превышение температуры обмотки статора ЭД (логарифмически-нормальное);

$$f(\tau) = \frac{1}{\tau \cdot 0,092\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(Ln \tau - 1,757)^2}{0,017} \left. \right\} \text{асинхронного электродвигателя.}$$

Совокупность значений эмпирических распределений работы ШПУ позволяет выполнить имитационное моделирование с помощью метода Монте-Карло режимов её функционирования и нагрева как случайных величин. Имитационная модель представляет собой совокупность алгоритмов моделирования необходимых законов распределения. Алгоритм моделирования – математическое выражение,

связывающее моделируемую величину с оценками параметров закона распределения и случайными числами равномерно ξ (в интервале 0,1) или нормально ξ' (в интервале $-3,3$) распределенными.

Имитационное моделирование процесса функционирования на ПЭВМ выполняется с целью получения количественных показателей эффективности работы ШПУ по формулам:

$k_n = 0,925 + 0,19\xi'$,	}	- скиповая,
$k_n = 0,885 + 0,15\xi'$,		- клетьевая,
$t_n = \exp(1,28 + 0,215\xi')$,		- скиповая с ручным управлением,
$t_n = \exp(1,455 + 0,092\xi')$,		- клетьевая, грузо-людская,
$t_\partial = 101,1 + 11,4\xi'$,		- скиповая с ручным управлением,
$t_\partial = 80,35 + 3,6\xi'$,		- скиповая с автоматиз. управлением,
$t_\partial = 123,3 + 8,5\xi'$,		- клетьевая, грузо-людская,
$\tau = \exp(1,757 + 0,092\xi')$,		- асинхронного электродвигателя.

Режимы, для которых не установлены распределения случайных величин - продолжительность времени технологической паузы скиповой ШПУ с автоматизированным управлением и температуры воздуха в здании ШПУ с достаточной точностью можно моделировать по эмпирической функции распределения этого показателя как случайные события по схеме полной группы простых событий [4].

Моделирование случайных величин, с нормальным законом распределения (а также: Равномерное, Бернулли, Биномиальное, Пуассона, Модельное, Дискретное) при заданных параметрах можно выполнить с помощью табличного процессора Microsoft Excel. Для этого в меню Сервис последовательно выбираются – *Анализ данных/Генерация случайных чисел*. Далее необходимо указать: *Число переменных - 1; Число случайных чисел - (***)*; выбрать вид *Распределения* (перечень приведен выше); задать *Параметры распределения* (для *Нормального закона - Среднее и Стандартное отклонение*); указать *Случайное рассеивание* (любое целое положительное число в диапазоне от 1 до 32767); определить *Параметры вывода: Выходной интервал*, либо *Новый рабочий лист*, либо *Новая рабочая книга*. Число случайных чисел $N - (***)$ характеризует точность моделирования и может быть определено из выражения

$$N = \left(\frac{\sigma_x U_\alpha 100}{\varepsilon} \right)^2, \quad \left. \vphantom{N} \right\} \text{ - число реализаций моделирования,}$$

где σ_x - среднее квадратическое отклонение моделируемой величины; U_α - квантиль нормально распределенной случайной величины (1,280,8; 1,640,9; 1,960,95; 2,580,99; 2,810,995; 3,290,999 – индексная часть указывает значение доверительной вероятности β); ε - точность полученного результата (1...10%).

Существующее сложное экономическое положение в отрасли не способствует своевременной замене электрооборудования ШПУ, исчерпавшей нормативный срок службы. Показателем надёжности, определяющим срок службы ШПУ, является долговечность.

Долговечность – согласно [5] это свойство объекта выполнять требуемые функции до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Исследования эксплуатационных показателей долговечности электрооборудования ШПУ свидетельствует о том, что срок службы (Тсл, лет) элементов электрооборудования меняется в интервале от 0,02 (короткозамкнутый виток) до 12 (обмотка статора). Кроме того, средняя наработка между отказами – (MTBF, ч) находится в пределах 103...5810, среднее время восстановления – (MTTR, ч) 1,54...3,94, а параметр потока отказов – ($z(t)$ сл,ч-1) за средний срок службы – (Тсл, ч) определяется выражением:

$$z(t)_{сл} = \frac{T_{сл}}{MTBF \times T_{г}},$$

где $T_{г}$ -- годовая продолжительность эксплуатации ШПУ (8760 ч).

Показатели долговечности, безотказности и ремонтпригодности основных элементов системы электропривода ШПУ приведены в таблице 3.

Анализ показателей надёжности (таблица 3) показывает, что большей средней наработке между отказами (103...5810 ч) соответствует больший средний срок службы (1,3...7,4 лет) и среднее время восстановления элемента (1,54...3,94 ч) – ранжирование в порядке возрастания. Исключением является MTBF магнитной станции вспомогательных приводов - 340 ч. Естественно, максимальный параметр потока отказов имеет роторная магнитная станция - $20,4 \times 10^{-3}$ ч-1 (МС2) – рисунок 1, а минимальный приводной двигатель - $1,3 \times 10^{-3}$ ч-1 (ЭД).

Вместе с тем, приводной электродвигатель считается одним из основных узлов ШПУ с максимальными функционально-стоимостными показателями.

Распределение коэффициента отказов электродвигателя ШПУ приведено на рисунке 2.

Таблица 3 – Усреднённые показатели надежности электрооборудования ШПУ

Наименование элемента	Средний срок службы Тсл, лет	Средняя наработка между отказами MTBF, ч	Среднее время восстановления MTTR, ч	Параметр потока отказов $\lambda(t)$ сл, 10 ⁻³ ч ⁻¹
Магнитная станция вспомогательных приводов (МС1)	1,3	340	1,54	3,8
Роторная магнитная станция (МС2)	2,1	103	1,57	20,4
Магнитная станция управления главным приводом (МС3)	4,0	250	**1,77	16,0
Приводной двигатель (ЭД)	7,4	5810	3,94	1,3

Детальные исследования безотказности элементов ЭД показывают, что более 78% его отказов приходится на щёточный и подшипниковый узлы, обмотки ротора и статора. Основными отказами этих элементов являются: износ контактных щеток и колец - 87% отказов щеточного узла; распайка соединений «петушков» и роторной шины - 92% отказов обмотки ротора; износ нижних вкладышей подшипников - 80% отказов узла подшипника скольжения; межвитковое замыкание и пробой пазовой изоляции - около 100% отка-

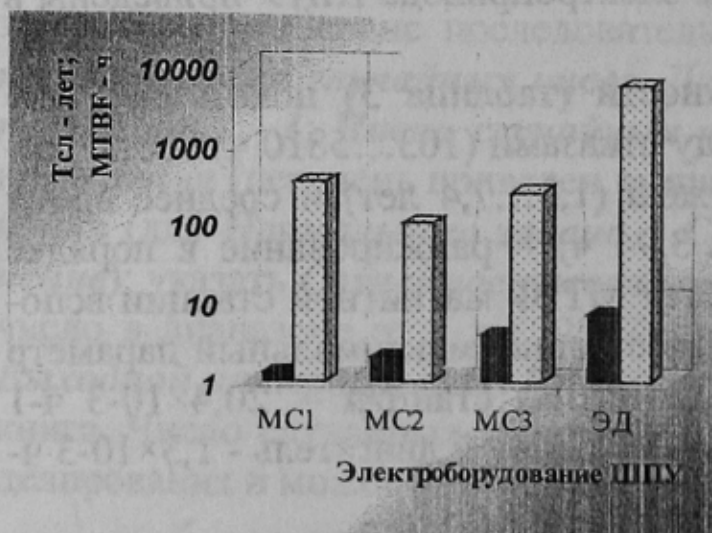


Рис.1 Логарифмическая диаграмма показателей надежности ШПУ

злов. Основными отказами этих элементов являются: износ контактных щеток и колец - 87% отказов щеточного узла; распайка соединений «петушков» и роторной шины - 92% отказов обмотки ротора; износ нижних вкладышей подшипников - 80% отказов узла подшипника скольжения; межвитковое замыкание и пробой пазовой изоляции - около 100% отка-

зов обмотки статора. Причинами таких отказов являются, как правило, перегрев и ускоренный износ изоляции обмоток ротора и статора, износые явления на щётчном и подшипниковом узлах. Вследствие этого фактический срок службы приводных асинхронных двигателей

до капитального ремонта (замена обмоток статора и ротора) составляют 8...12 лет эксплуатации, тогда как плановый срок службы 25 и более лет.

Перспективными вариантами повышения долговечности магнитных станций и приводного ЭД на ближайшие 5-10 лет, на наш взгляд, является: разработка методов и средств

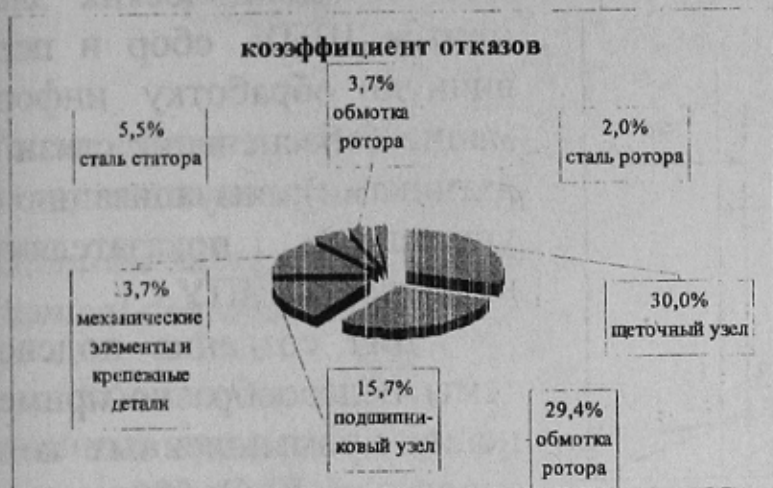


Рис.2 Круговая диаграмма показателей безотказности ЭД

прогнозирования остаточного ресурса узлов; создание автоматизированной системы оперативного управления надёжностью и безопасностью функционирования ШПУ.

Методом многоступенчатого линейного прогнозирования [2] можно учесть действительную закономерность изнашивания объекта диагностирования в условиях эксплуатации на основании измерений диагностического параметра рис. 3. Гарантированный ресурс безотказной работы $t_{гар}$ время зависимых узлов можно определить выражением

$$t_{гар} = \frac{\Pi_n - \Pi_u}{(\Pi_u - \Pi_{u-1})t_0}, \quad t_0 = t_u - t_{u-1},$$

$$tg \varphi_1 = i_{cp1,2} = \frac{\Pi_2 - \Pi_1}{t_2 - t_1}, \quad tg \varphi_2 = i_{cp2,3} = \frac{\Pi_3 - \Pi_2}{t_3 - t_2},$$

где $\Pi_n, \Pi_{u,u-1}$ – предельная и измеренные величины диагностического параметра при текущем и предыдущем диагностировании; t_0 – корректирующее время (период между текущим и предыдущим диагностированием); $t_{u,u-1}$ – время текущего и предыдущего диагностирования; i_{cp} – средняя интенсивность измерения параметра.

Подсистема АСУТП «Надежность» предполагает диагностируемый (безразборный) контроль основных электрических и механических элементов ШПУ, сбор и первичную обработку информации (обеспечение связи с датчиками); визуализацию и управление показателями надёжности ШПУ.

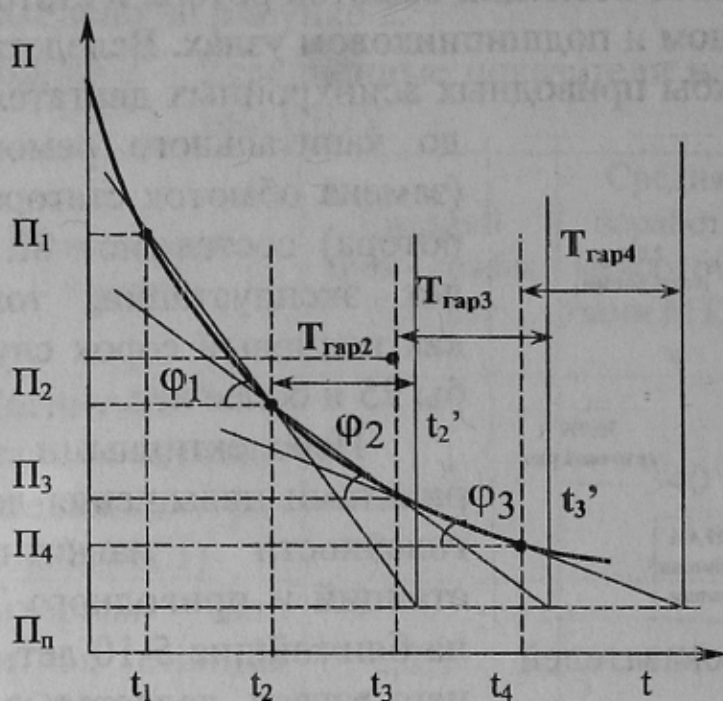


Рис.3 Уменьшающаяся зависимость с убывающей интенсивностью прогнозирования ресурса

Для создания подсистемы целесообразно применение промышленных контроллеров SLC 500 производства Allen Bradley или серии Micrologix 1000 - 1500 с программным обеспечением RSLogix500. Уровень человеко - машинных интерфейсов (SCADA-системы) может реализовываться рабочими станциями оператора на RISC или Intel – совместимой платформе специальными программными продуктами визуализации типа RSview32 производства Rockwell Software.

Для создания подсистемы целесообразно применение промышленных контроллеров SLC 500 производства Allen Bradley или серии Micrologix 1000 - 1500 с программным обеспечением RSLogix500. Уровень человеко - машинных интерфейсов (SCADA-системы) может реализовываться рабочими станциями оператора на RISC или Intel – совместимой платформе специальными программными продуктами визуализации типа RSview32 производства Rockwell Software.

может реализовываться рабочими станциями оператора на RISC или Intel – совместимой платформе специальными программными продуктами визуализации типа RSview32 производства Rockwell Software.

Список источников.

1. Макаров М.И., Кърцелин Е. Надёжность ШПУ. Донецк, 1996.-310 с.
2. Методические указания к лабораторным работам по курсу "Надежность и диагностирование" с применением табличного процессора EXCEL (для студентов специальности 7.092501) /Сост.: Г.В. Серезентинов, К.Н. Маренич, В.К. Саулин - Донецк: ДГТУ, 2000 - 55с.
3. Влияние режимов работы и условий эксплуатации на надежность рудничного электрооборудования. В кн. Миновский Ю.П. Эффективность электроснабжения забоев угольных шахт- М.:Недра, 1990.- 158с.
4. Методические указания к лабораторным работам по курсу "Идентификация и моделирование технических объектов" (для студентов специальности 7.092501) /Сост.: Г.В. Серезентинов, В.И. Груба - Донецк: ДГТУ, 1997 - 55с.
5. ДСТУ 2860-94 Надёжность техники. Термины и определения. Госстандарт Украины. Киев, 1994.-74 с.