

УДК 629.488

КАПИЦА М. И., доктор технических наук, профессор кафедры «Локомотивы»,  
ЛАГУТА В. В., кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь»,  
СЕРДЮК Т. Н., кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» (Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

## Определение системы диагностирования ТЭД с учетом выбора предпочтительных элементов с изменяющейся интенсивностью отказов

Целью исследования является моделирование параметров системы диагностирования тяговых электродвигателей локомотивов для обеспечения заданного уровня надежности. Исследования выполнены на основе процедуры многокритериальной оптимизации, методов теории надежности и теории восстановления. В статье представлена процедура многокритериальной оптимизации системы диагностики тягового электродвигателя, учитывающая несколько показателей качества: количество моментов диагностирования, среднюю наработку на отказ. Дан метод построения моментов диагностирования компонент тягового электродвигателя с дальнейшим определением рациональных объемов диагностирования и определения соответствующих результирующих моментов диагностирования двигателя как единой системы. Моменты диагностирования выбираются так, чтобы вероятности отказов компонент не опускались ниже наперед заданной величины. Предложен новый метод построения рациональной системы диагностирования тягового электродвигателя на множестве Парето критериев: минимум количества выполнения диагностик, максимум средней наработки на отказ. Исследования выполнены в соответствии с «Государственной программой стратегического развития железных дорог Украины», подготовленной Государственным научно-исследовательским центром железнодорожного транспорта Украины совместно со специалистами Укрзалізниця, и Программой обновления тягового подвижного состава железных дорог на период до 2020 года. Необходимое качество системы диагностирования следует определять совместно с объектом диагностики, учитывая требования, предъявляемые к последнему. Система диагностирования технического объекта зависит от технологии производства и технологии восстановления применяемых компонент, что дает возможность выбирать исполнителя проведения восстановительных работ или производителя компонент объекта, и в дальнейшем перейти от планово-предупредительной технологии обслуживания к обслуживанию по состоянию объекта.

**Ключевые слова:** сложная система, система диагностирования, эффективность диагностической системы, моменты диагностирования, тяговый электродвигатель.

### Введение

Новый этап в развитии систем содержания, как тяговых электродвигателей (ТЭД), так и локомотивного парка в целом, невозможен без широкого использования диагностических систем. В результате большинство железных дорог в технически развитых странах в конце шестидесятых – начале семидесятых годов прошлого века приступили к созданию как средств технического диагностирования, так и систем контроля технического состояния тягового подвижного состава (ТПС).

### Актуальность

В соответствии с «Государственной программой стратегического развития железных дорог Украины», подготовленной Государственным научно-исследовательским центром железнодорожного транспорта Украины совместно со специалистами Укрзалізниця, разработана отраслевая Программа обновления тягового подвижного состава железных дорог на период до 2020 года, где указана необходимость:

- создания бортовых и стационарных средств технического диагностирования и алгоритмов их работы;
- освоения производства средств контроля и диагностирования.

© М. И. Капица, В. В. Лагута, Т. Н. Сердюк, 2017

Целью исследования является моделирование параметров системы диагностирования тяговых электродвигателей локомотивов для обеспечения установленного уровня надежности.

### Задача исследования

Выбор параметров рациональной системы диагностирования тягового электродвигателя локомотива с изменяющейся функцией интенсивности отказов.

Исследования, которые проводятся сейчас, дают возможность более обоснованно ответить на вопрос - диагностирование вместо плановости технического содержания локомотивов или рядом с плановостью, но в качестве лишь фактора, который корректирует плановую систему и объемы ремонтных работ [1 - 4].

В настоящее время современные системы содержания ТЭД строятся с использованием наблюдений о текущем состоянии, что с необходимостью приводит к разработке устройств и систем диагностирования [5]. Диагностирование имеет место в том случае, когда процесс характеризуется монотонно изменяющимися во времени параметрами. Такими параметрами, например, могут быть параметры функции интенсивности отказов.

Надежность элементов сложной системы различна, поэтому и период их диагностирования и профилактики различный. Однако, если проводить профилактику по состоянию элементов, то необходимо больше затрат времени из-за увеличения частоты диагностирования.

### Постановка задачи и исходные данные

Диагностика нужна как средство продления периода эксплуатации системы, когда интенсивность отказов – величина переменная. В процессе эксплуатации (старения, износа) система диагностирования необходима для снижения величины интенсивности отказов. Периодичность диагностирования, как правило, обосновывается по статистическим данным об отказах изделия и известным требованиям на показатели его надежности. Такой способ обоснования периодичности диагностирования имеет и недостатки. Могут возникнуть ошибки в выборе периодичности диагностирования конкретного образца изделия.

Процесс диагностирования необходим в случае планирования восстановительных работ, учитывая состояние ТЭД. Для этого необходим непрерывный контроль его состояния. Выбор рациональных периодов проведения диагностирования позволяет уменьшить количество проведения необходимого объема измерений и выполнения профилактических работ.

Для тягового электродвигателя (ТЭД) систему диагностирования будем проектировать как для объекта, состоящего из трех элементов: коллектор со щетками (Э1), якорь (Э2), магнитная система (Э3). Каждый из элементов характеризуется функцией интенсивности отказов. Причем, при восстановлении объекта или его проектировании возможен выбор элементов, обладающих различными функциями интенсивности отказов. Такая ситуация возможна, поскольку элементы изготавливаются различными производителями или восстанавливаются разными ремонтными предприятиями.

Система диагностирования ТЭД определяется в виде последовательности пар  $(\tau_i, V_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $\tau_i$  - моменты проведения диагностирования,  $V_i$  - соответствующие объемы диагностирования (перечень элементов, подвергающихся диагностированию),  $n$  - количество моментов диагностирования за наработку  $T$ . Целью диагностической системы является формирование управляющего воздействия при возникновении неисправности. За критерии оценки эффективности функционирования диагностической системы принимаем

$$\min \left\{ \begin{array}{l} n \\ -T \end{array} \right\}. \quad (1)$$

Векторная постановка задачи присуща многим задачам аналитического проектирования эффективных систем, решение которых требует разработки специальных методов [6 - 8].

В качестве исходной информации полагаем известным поведение интенсивностей отказов элементов ТЭД без учета профилактических работ в течение достаточно большой наработки.

Каждому значению момента диагностирования приписывается коэффициент (усредненное значение)  $\gamma_j$ ,  $\{0 \leq \gamma_j \leq 1\}$ ,  $j = \overline{1, n}$  характеризующий уменьшение интенсивностей отказов элементов объекта после проведения необходимой профилактики в момент диагностирования.

Моменты диагностирования выбираются так, чтобы вероятности отказов элементов не опускались ниже наперед заданной величины  $\beta\%$ . Далее моменты проведения диагностирования классифицируются (объединяются), составляя элементы диагностирования в один объем с некоторой точностью  $\delta$  так, как описано в [1] касательно восстановления технических объектов.

ТЭД может комплектоваться своими элементами с разными надежностными характеристиками (функции интенсивности отказов). В

рассматриваемой задаче функции интенсивности отказов являются монотонно возрастающими (в расчетах линейные) и взяты из работы [2] для двигателя НБ-406. Функция  $\lambda_{ij}(t)$  характеризует поток отказов на первом периоде диагностирования  $i$ -го элемента ТЭД,  $i = \overline{1,3}$  с номером  $j$ ,  $j = \overline{1, l_i}$ ,

$l_i$  – количество  $i$ -х элементов. Известно: если интенсивность отказа объекта постоянна, то диагностирование с профилактикой выигрыша в надежности не дает.

Исходные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные данные задачи определения рациональной системы диагностирования ТЭД**

Параметры настройки алгоритма	Интенсивность потока отказов элементов ТЭД		
	Коллектор со щетками (Э1) [тыс. км <sup>-1</sup> ]	Якорь (Э2) [тыс. км <sup>-1</sup> ]	Магнитная система (Э3) [тыс. км <sup>-1</sup> ]
$\gamma_j \in \{0.7, 0.8, 0.9\}$ , $j = \overline{1, n}$	$\lambda_{11}(t)$	$\lambda_{21}(t)$	$\lambda_{31}(t)$
$\beta \in \{0.95, 0.9\}$		$\lambda_{22}(t)$	$\lambda_{32}(t)$
$\delta = 12$ тыс. км		$\lambda_{23}(t)$	
Количество элементов	$l_1 = 1$	$l_2 = 3$	$l_3 = 2$

**Порядок построения системы диагностирования**

Пусть  $\lambda_1^0(t)$ ,  $\lambda_2^0(t)$ ,  $\lambda_3^0(t)$  – интенсивности отказов элементов, выбираемых как вариант комплектации

$$\lambda_1^0(t) = \lambda_{11}(t), \lambda_2^0(t) = \lambda_{2j}(t), \quad j = \overline{1, l_2},$$

$$\lambda_3^0(t) = \lambda_{3j}(t), \quad j = \overline{1, l_3}.$$

Первоначально моменты диагностирования для  $i$ -го элемента  $t_{ik}$ ,  $k$  – номер момента, определяются из условия, что вероятность безотказной работы элемента не опускается ниже наперед заданной величины  $P_i^0$

$$P_i(t_{ik}) = e^{-\int_{\alpha}^{\beta} \lambda_i^{k-1}(\tau) d\tau} \geq P_i^0, \quad k=1, 2, 3...$$

$$\alpha = t_{i, k-1}, \quad \beta = t_{ik}, \quad t_{i0} = 0,$$

где  $P_i(t_{ik})$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента объекта на  $k$ -м периоде диагностирования;

$\lambda_i^k(\tau)$  – интенсивность отказов  $i$ -го элемента на  $k$ -м периоде диагностирования, рис. 1.

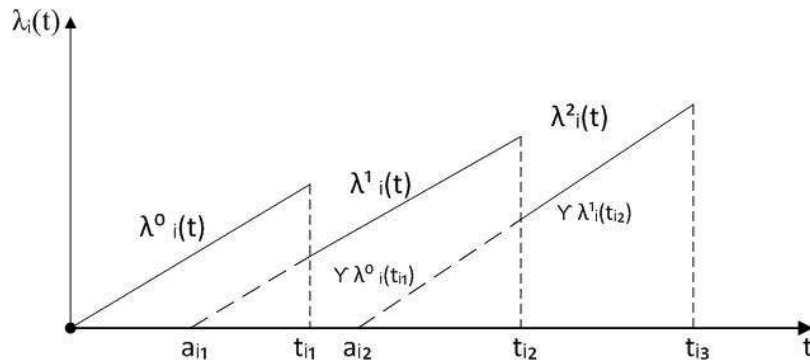


Рис. 1. Функция интенсивности отказов  $i$ -го элемента

Функции  $\lambda_i^k(t)$ ,  $k=1,2,3K$  определяются

$$\lambda_i^1(t) = \lambda_i^0(t - a_{i1}); \quad \lambda_i^2(t) = \lambda_i^0(t - a_{i2}); \quad \dots ;$$

$$\lambda_i^k(t) = \lambda_i^0(t - a_{ik}), \dots,$$

причем

$$\lambda_i^k(t) = \begin{cases} 0, & t < t_{ik} \\ \lambda_i^0(t - a_{ik}), & t \geq t_{ik} \end{cases}.$$

Соответствующие величины смещения  $a_{ik}$  находятся из решения уравнений

$$\lambda_i^0(t - a_{i1}) = \gamma \cdot \lambda_i^0(t_{i1}); \quad \lambda_i^0(t - a_{i2}) = \gamma \cdot \lambda_i^1(t_{i2});$$

$$\dots; \quad \lambda_i^0(t - a_{i2}) = \gamma \cdot \lambda_i^{k-1}(t_{i2}).$$

Количество диагностирований для  $i$ -го элемента соответствует условию выполнения неравенства

$$t_{i,m_i+1} - t_{i,m_i} \leq \delta,$$

если интенсивность отказов – непостоянная величина. Величина  $t_{i,m_i}$  принимается в качестве средней наработки на отказ  $T_i = t_{i,m_i}$   $i$ -го элемента

$$m_i = \max k : \max_k t_{ik} \leq T_i,$$

а  $m_i$  - соответствующее количество диагностирований за эту наработку.

Среднюю наработку на отказ  $i$ -го элемента

$$T_i = \int_0^{\infty} P_i(\tau) d\tau$$

можно определить, учитывая особенность представления функции интенсивности отказов, приближенно как

$$T_i = I_{i0} + I_{i1} + I_{i2} + K I_{in},$$

где 
$$I_{ik} = \int_{\alpha}^{\beta} e^{-\alpha \tau} \lambda_i^{k-1}(\theta) d\theta d\tau, \quad k=1,2,K,n,$$

$$\alpha = t_{ik-1}, \quad \beta = t_{ik}, \quad I_{in+1} \leq \varepsilon,$$

$\varepsilon$  – заданная точность вычисления несобственного интеграла  $T_i$ .

Средняя наработка на отказ объекта составит

$$T_0 = \min \{T_1, T_2, T_3\}.$$

Далее моменты диагностирования и объемы работ, связанных с этим, уточняются.

Имея в виду определение рациональной системы диагностирования (в нашем случае минимизируется количество моментов времени диагностирования), пойдем по пути объединения моментов диагностирования (рис. 2). Как определили, система диагностирования первоначально определяется набором периодов по наработке для каждого элемента. Это означает, что набор  $t_{ik}$ ,  $k=\overline{1,m_i}$  определяет систему диагностирования для  $i$ -го элемента.

Моменты диагностирования объединяются в соответствии с процедурой, описанной в [1]. Полученные моменты диагностирования  $\{t_{ik}\}$ ,  $k=\overline{1,m_i}$ ,  $i=1,2,3$  объединяются в один массив по возрастанию, в результате получим единый массив  $\{\tau'_i\}$ ,  $i=\overline{1,m}$ ,  $m=m_1+m_2+m_3$ .

Если при построении системы диагностирования наработки некоторых объемов диагностирования будут отличаться друг от друга на величину не более чем  $\delta > 0$ , то такие объемы составляют вместе и им назначается минимальная наработка – строится система диагностирования с недоработкой. Если составленным объемам тестирования назначается наработка, равная минимальной наработке, соответствующая объединенным элементам плюс  $\delta$ , то строится система диагностирования с переработкой. При объединении с точностью  $\delta$  нескольких моментов диагностирования считается, что получен один момент времени тестирования. В результате проведения процедуры объединения моментов диагностирования элементов получим результирующие моменты наработки  $\{\tau_i\}$ ,  $i=\overline{1,n}$ ,  $n$  – количество моментов диагностирования. Объем диагностирования представляет  $V \in 2^{\mathcal{E}} \setminus \emptyset$ ,  $\mathcal{E} = \{\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3\}$ .

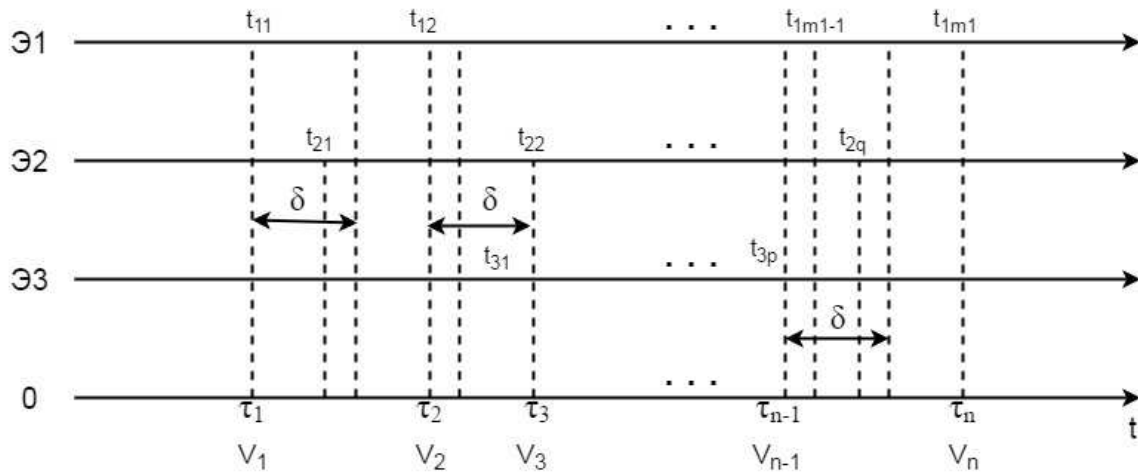


Рис. 2. Выбор моментов и объемов диагностирования:

$\delta$  – точность построения системы диагностирования;  $\tau_i$  –  $i$ -й момент диагностирования;  $V_i$  – объем диагностирования для  $i$ -го момента тестирования:  $V_1=\{\text{Э1, Э2}\}$ ,  $V_2=\{\text{Э1}\}$ ,  $V_{n-1}=\{\text{Э3, Э1, Э2}\}$ ,  $V_n=\{\text{Э1}\}$

Выбор предпочтительных элементов из паретовского множества осуществлялся самым простым способом их сравнительной оценки сворачиванием частных критериев в единый, используя линейную свертку

$$L(\lambda) = \sum_j c_j \cdot F_j(\lambda), \quad (2)$$

где  $c_j$  – некоторые положительные коэффициенты, нормированные определенным способом;

$$\lambda = [\lambda_1^0(t), \lambda_2^0(t), \lambda_3^0(t), \gamma, P^0, \delta] - \text{вектор}$$

параметров критерия;

$F_j(\lambda)$  – значение  $j$ -го критерия,  $j=1, 2$ .

Нормировочными значениями коэффициентов приняты  $c_1=1$ ,  $c_2=31.362$ , выбирались из условия уравнивания средних значений  $F_1(\lambda)$  и  $F_2(\lambda)$ , табл. 2.

Анализ отобранных моделей в соответствии с критерием 2 позволяет отдать предпочтение варианту комплектации ТЭД  $\{\lambda_{11}, \lambda_{23}, \lambda_{32}\}$ . Выбор экспертов при опросе пал на предпочтении варианта  $\{\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{31}\}$  – первый эксперт и  $\{\lambda_{11}, \lambda_{23}, \lambda_{32}\}$  – второй эксперт.

Таблица 2

**Принятие решения в определении рациональной системы диагностирования ТЭД**

Интенсивность отказов элементов			Наработка на отказ $T$ тыс. км $F_1(\lambda)$	Количество диагностик $F_2(\lambda)$	Принадлежность множеству Парето (*)	Критерий $L(\lambda)$ $c_1=1$ $c_2=31.36$
Элемент $\text{Э}_1$	Элемент $\text{Э}_2$	Элемент $\text{Э}_3$				
$\lambda_{11}(t)$	$\lambda_{21}(t)$	$\lambda_{31}(t)$	438	15		1.034
	$\lambda_{21}(t)$	$\lambda_{32}(t)$	472	12		-3.050
	$\lambda_{22}(t)$	$\lambda_{31}(t)$	501	16	*	0.0256
	$\lambda_{22}(t)$	$\lambda_{32}(t)$	527	21		6.196
	$\lambda_{23}(t)$	$\lambda_{31}(t)$	546	18	*	0.591
	$\lambda_{23}(t)$	$\lambda_{32}(t)$	485	10	*	-5.464

*Замечание.* Время проведения диагностирования и время восстановления элементов, если такая необходимость возникает, в процессе моделирования системы диагностирования не учитывались.

Не всегда выбираемые компоненты ТЭД имеют функцию интенсивности отказов монотонной (линейной, квадратичной и т.п.). Обычно функцию интенсивности отказов определяют как  $\lambda(t) = const$ .

Если  $\lambda(t)$  – постоянная величина, тогда периоды диагностирования  $T_i$  не будут уменьшаться с увеличением  $i$ . При  $\lambda(t) = const$  периоды диагностирования получаются равными. При таком предположении метод определения периодов диагностирования не применим. Использование описанного метода возможно в том случае, когда хотя бы один из элементов комплектации ТЭД имеет монотонную функцию интенсивности отказов. В таком случае периоды диагностирования с увеличением наработки уменьшаются.

#### Выводы

Необходимое качество системы диагностирования следует определять совместно с объектом диагностирования, учитывая требования, предъявляемые к последнему.

Система диагностирования технического объекта зависит от технологии производства и восстановления применяемых компонент, что дает возможность выбирать исполнителя восстановительных работ или производителя элементов объекта.

#### Список использованных источников

1. Босов, А. А. Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог [Текст]: монография / А. А. Босов, П. А. Лоза. – Днепропетровск: Дриант, 2015. – 252 с.
2. Капица, М. И. Развитие научных основ усовершенствования систем удерживания тягового рухогого складу [Текст]: дис... д-ра техн. наук : 05.22.07 / М. И. Капица [Дніпропетровський нац. ун-т залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна]. – Дніпропетровськ : Дніпропетр. нац. ун-т залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. – 349 с.
3. Кузнецов, Т. Ф. Автоматизовані діагностично-статистичні комплекси та їх застосування в системі утримання тягового рухогого складу залізниць [Текст] / Т. Ф. Кузнецов, М. И. Капица // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту. – 2002. – Вип. 3(114). – С. 100-104.
4. Капица, М. И. Основные пути развития диагностики локомотивов [Текст] / М. И. Капица, Б. Е. Боднар, Я. Е. Савич // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2003. – № 9(67). – С. 96-100.

5. Дубинин, А. Е. Устройство телеметрического контроля тягового электродвигателя [Текст] / А.Е. Дубинин, А. А. Дубинин, Н. Н. Цаплин // Тез. I Междунар. науч.-практ. конференции «Инновации в системах обеспечения движения поездов», 2016. – Самара : СамГУПС, 2016. – 64 с.
6. Dong-Seok Kong. Method and Case Study of Multiobjective Optimization-Based Energy System Design to Minimize the Primary Energy Use and Initial Investment Cost [Электронный ресурс] / Dong-Seok Kong, Yong-Sung Jang, Jung-Ho Huh Energies. – 2015. – Vol. 8. – P. 6114-6134. – Режим доступа: [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies). DOI:10.3390/en8066114.
7. Priftis. Parametric Design and Multiobjective Optimization of Containerships [Text] / Priftis, Alexandros, Papanikolaou, Apostolos, Plessas, Timoleon // Journal of Ship Production and Design. – February 2017. – Vol. 33, № 1. – P. 46-59.
8. Evolutionary Multi-Criterion Optimization. 9th International Conference [Электронный ресурс] / ЕМО. – Münster, Germany, March 19-22, 2017. – Режим доступа: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-54157-0>.

**Капица М. І., Лагута В. В., Сердюк Т. М. Визначення системи діагностування ТЕД з урахуванням вибору бажаних елементів зі змінною інтенсивністю відмов.** Метою дослідження є моделювання параметрів системи діагностування тягових електродвигунів локомотивів для забезпечення встановленого рівня надійності. Дослідження виконані на основі процедури багатокритеріальної оптимізації, методів теорії надійності і теорії відновлення. У статті надана процедура багатокритеріальної оптимізації системи діагностування тягового електродвигуна, що враховує декілька показників якості: кількість моментів діагностування, середнє напрацювання на відмову. Подано метод побудови моментів діагностування компонент тягового електродвигуна з подальшим визначенням раціональних обсягів діагностування і визначенням відповідних результуючих моментів діагностування двигуна як єдиної системи. Моменти діагностування вибираються так, щоб ймовірності відмов компонентів не опускалися нижче наперед заданої величини. Запропоновано новий метод побудови раціональної системи діагностування тягового електродвигуна на множині Парето критеріїв: мінімум кількості виконання діагностувань, максимум середнього напрацювання на відмову. Дослідження виконані відповідно до «Державної програми стратегічного розвитку залізниць України», підготовленої Державним науково-дослідним центром залізничного

транспорту України спільно з фахівцями Укрзалізниці, і Програмою оновлення тягового рухомого складу залізниць на період до 2020 року. Необхідну якість системи діагностування слід визначати спільно з об'єктом діагностики, враховуючи вимоги, що ставляться до останнього. Система діагностування технічного об'єкта залежить від технології виробництва і технології відновлення застосовуваних компонент, що дає можливість обирати виконавця проведення відновлювальних робіт або виробника компонентів об'єкта, і в подальшому перейти від планово-попереджувальної технології обслуговування до обслуговування за станом об'єкта.

**Ключові слова:** складна система, система діагностування, ефективність діагностичної системи, моменти діагностування, тяговий електродвигун.

**M. I. Kapitsa, V. V. Laguta, T. M. Serdiuk.**  
**Determination of a traction electric motor diagnostic system taking into account the choice of the preferred elements with a varying failure rate.** The purpose of study is the simulation the parameters of the locomotive traction motor diagnosis system to ensure a given level of reliability. The research was carried out on the basis of the multi-criteria optimization procedure, methods of the reliability theory and the recovery theory. The procedure of multicriteria optimization for the traction motor diagnostics system was presented that accounts for the following quality indicators: the number of diagnostic moments, and the mean time to failure. A method for constructing the moments of diagnosing components of a traction motor have been presented with the further determination of rational volumes of diagnosis and determination of corresponding resulting moments of diagnosing the engine as a single system. The diagnosis moments are selected so that the failure probability of the components does not fall below the pre-set value. A new method for constructing a rational system for diagnosing a traction motor has been proposed by the definition of the Pareto criteria: the number of diagnostic tests, the mean time between failures. The Research was carried out with the State Program for the Strategic Development of Railways of Ukraine prepared by the State Research Center for Railway Transport of Ukraine in conjunction with the specialists of Ukrzaliznytsia, and Renovation Program of the Traction Rolling-Stock of Railways to the 2020 year. The necessary quality of the diagnostic system should be determined according to the diagnosed object, taking into account the requirements imposed on the latter. The system of diagnosing of a technical object depends on the production technology and the technology of renovation of the components used, which makes it possible to choose the performer of the repair work or the manufacturer of the components of the technical object.

**Keywords:** complex system, diagnostic system, the effectiveness of the diagnostic system, the moments of diagnosis, the traction motor.

Надійшла 21.07.2017 р.

**Kaniца M.I.,** доктор технічних наук, професор кафедри «Локомотиви», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, Україна. E-mail: m.i.kapica@ua.fm

**Лазута В.В.,** кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, Україна. E-mail: vasilij.laguta@gmail.com

**Сердюк Т.М.,** кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматика, телемеханіка та зв'язок», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, Україна. E-mail: serducheck-t@rambler.ru

**Kapitsa M.I.,** Doctor of Engineering, Professor department of «Locomotives», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine. E-mail: m.i.kapica@ua.fm

**Laguta V.V.,** Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor department of «Automation, telemechanics and communication», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine. E-mail: vasilij.laguta@gmail.com

**Serdiuk T.M.,** Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor department of «Automation, telemechanics and communication», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, Ukraine. E-mail: serducheck-t@rambler.ru