



UDC: 621.314

## ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ НАДЕЖНОСТИ

**Якубов Миржалил Сагатович,**  
кандидат технических наук, профессор;

**Каримов Ислом Азим угли,**  
ассистент,  
e-mail: nauka.islom@gmail.com;

**Муминов Сардор Сайидмурод угли,**  
ассистент

Ташкентский государственный транспортный университет

***Аннотация.** В работе рассмотрены вопросы надежности многоуровневого информационно-измерительного комплекса (ИИК), осуществляющего контроль технического состояния и диагностирование технологических объектов и устройств тягового электрооборудования, от которого зависит качество оперативно-диспетчерского управления его режимов. Произведена оценка технического состояния ИИК с помощью векторов вероятностей их состояния с применением линейного графа, позволяющего определить время безотказной работы и других показателей надежности отдельно по каждому уровню и ИИК в целом. Аналитическими и графическими исследованиями показано, что время безотказной работы ИИК сильно зависит от интенсивности отказов его нижних ступеней. При исследовании работоспособности ИИК и его структурных составляющих применена также классическая теория оценки надежности с использованием алгоритма коррекции, позволяющего повысить вероятность безотказной работы исследуемого ИИК.*

***Ключевые слова:** информационно-измерительный комплекс, надежность, интенсивность отказа, линейный граф, обработка, измерительный сигнал.*

## ИШОНЧЛИЛИК МЕЗОНИ АСОСИДА ТОРТИШ ЭЛЕКТР ТАЪМИНОТИ ОБЪЕКТЛАРИНИ ДИАГНОСТИКАЛАШНИНГ АХБОРОТ-ЎЛЧОВ МАЖМУАСИ ТИЗИМИНИ ОПТИМАЛЛАШТИРИШ

**Якубов Миржалил Сагатович,**  
техника фанлари номзоди, профессор;

**Каримов Ислом Азим ўгли,**  
ассистент;

**Мўминов Сардор Сайидмурод ўгли,**  
ассистент

Тошкент давлат транспорт университети

***Аннотация.** Мақолада тортувчи электр таъминот технологик объектлари ва қурил-маларининг бошқариш режимлари сифатини белгилайдиган техник ҳолатини назорат қи-*



лиш ҳамда диагностикалашда фойдаланиладиган ахборот-ўлчаш комплексларининг (АЎК) ишончилилик масалалари кўриб чиқилган. АЎК ҳар бир сатҳи ва яхлитлигининг бешикаст ишлаши ҳамда реал техник ҳолатини баҳолаш, шунингдек, ишончилиكنинг бошиқа кўрсаткичларини аниқлаш учун эҳтимоллар векторлари ва чизиқли граф назариясидан фойдаланилган. Аналитик ва график тадқиқотлар асосида АЎКнинг бешикаст ишлаш вақти унинг бевосита қуйи сатҳларининг ишдан чиқиши жадаллигига боғлиқлиги кўрсатилган. Шу билан бирга, яхлит АЎК ва унинг қуйи сатҳлари бешикаст ишлаши классик назариялар асосида ҳисобланган. Бунда бешикаст ишлашнинг эҳтимоллигини ҳисоблашда ахборотнинг коррекциялаш алгоритми қўлланилган.

**Калим сўзлар:** ахборот-ўлчаш комплекси, ишончилилик, ишдан чиқиши, жадаллик, чизиқли граф, ишлов бериши, ўлчаш сигнали.

## OPTIMIZING THE STRUCTURE OF THE INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM FOR DETECTING TRACTION POWER SUPPLY FACILITIES ON THE BASIS OF RELIABILITY

**Yakubov Mirjalil Sagatovich,**  
Doctor of Philosophy (PhD), Professor;

**Karimov Islom Azim ugli,**  
Assistant;

**Muminov Sardor Sayidmurod ugli,**  
Assistant

Tashkent State Transport University

**Abstract.** The paper discusses reliability of a multi-level information-measuring system (IMC), which ensures monitoring of technical condition of technological facilities and traction power supply devices and their diagnostics, which is essential for quality of control of its modes. The technical condition of the IMC is assessed using probability vectors of its condition by applying a linear graph that allows defining the time of failure and other reliability measures individually for each level and the IMC as a whole. Analytically and graphically, it is shown that the failure time of the IMC is highly dependent on the failure rate of its lower stages. In the study of the efficiency of IMC and its structural components, classical theory of reliability assessment using a correction algorithm has been applied, which makes it possible to improve probability of the information-measurement system operation without fail.

**Keywords:** information-measuring system, reliability, failure rate, linear graph, processing, measuring signal.

### Введение

Важным показателем надежности информационно-измерительного комплекса тягового электроснабжения высокоскоростной магистрали (ИИК) железной дороги является среднее время безотказной работы, определяемое выражением [1; 2; 4; 7]:

$$T_0 = \int_{i=1}^{i=n} P_i(t) dt, \quad (1)$$

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$  – ступени ИИК.

Ступенчатая иерархическая структура такой системы приводит, с одной стороны, к возрастанию числа контролируемых объ-



ектов, приводящему к увеличению числа отказов, что приводит к уменьшению надежности. С другой стороны, оптимальное распределение функций между ступенями этой системы приводит к увеличению надежности, что в конечном счете влияет на установление режима качественного функционирования силовых объектов и установок оперативно-диспетчерского управления, приводящий к экономической эффективности.

В работах ряда авторов в основном исследованы локальные структуры информационно-измерительной системы оперативно-диспетчерского управления [1]. Однако практически отсутствуют исследования информационно-измерительного комплекса технического контроля диагностики объектов электроснабжения, совмещенного с существующей системой оперативно-диспетчерского управления, и вопрос его оптимизации.

Анализ эксплуатационной надежности существующей информационно-измерительной системы технического контроля и диагностики объектов электроснабжения высокоскоростного участка «Ташкент – Самарканд – Бухара», проведенной нами в течение 2017–2020 гг. в АО «O‘zbekiston temir yo‘llari», показал, что система диагностики силового оборудования тяговой подстанции и соответствующей контактной сети характеризуется локальной структурой и отсутствием расширенных функциональных возможностей, недостаточной точностью и чувствительностью и прерывностью передачи диагностируемой информации, что приводит к сокращению безотказной работы всей системы электроснабжения.

Актуальность задачи и целью статьи является разработка многоуровневого информационно-измерительного комплекса контроля технического состояния и диагностирования с целью повышения информационной эффективности, эксплуатационной надежности и оптимизации его структуры путем совмещения со структурой существующей системы оперативно-диспетчерского управления по метрологическим, конструк-

тивно-техническим характеристикам, а также применения принципа функциональной избыточности посредством дублирования каналов передачи и обработки измерительной информации, характеризующего диагностические признаки и с учетом времени передачи информации по каждому уровню иерархической структуры.

### Материалы и методы

Предположим, что исследуемый ИИК имеет широко распространенную 3-х ступенчатую структуру с интенсивностью отказов объектов каждой ступени соответственно  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  [3; 4].

Для определения времени прохождения сигнала  $T_0$  используем методику [4], учитывая показатели надежности многоуровневой системы. Для оценки технического состояния многоуровневых систем предлагаем использовать линейный граф, ветви которого соответствуют переходам из состояния  $A_i$  в состояние  $A_j$ .

### Результаты исследования

В матричной форме состояние ИИК описываем дифференциальным уравнением [4; 5]:

$$\frac{d}{dt} \bar{P}(t_3) = \bar{P}(t_3) \Lambda, \quad (2)$$

где  $\bar{P}(t_3)$  – вектор вероятностей состояний трехуровневой системы в момент времени  $t$ ,  $\Lambda$  – матрица интенсивностей переходов.

Недиагональные элементы матрицы интенсивностей переходов определяем переходами системы из состояния  $A_i$  в состояние  $A_j$ . Сумма элементов каждой  $i$ -ой строки матрицы  $\Lambda$  удовлетворяют условию [4]:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_{ij} = 0, \quad (3)$$

где  $i, j$  – однозначно соответствуют ветвям линейного графа, описывающим переходы из состояния  $A_i$  в состояние  $A_j$ .

В операторной форме уравнение (2) принимаем в виде [4; 5; 17]:

$$\bar{P}(p) = \bar{P}(p) \frac{1}{p} \Lambda + \frac{1}{p} \bar{P}(0), \quad (4)$$



где вектор  $\bar{P}(0)$  характеризует начальное состояние ИИК.

Уравнение (4) целесообразно решать с помощью линейного графа, в котором вероятности состояния ИИК характеризуются коэффициентом передачи графа [5; 14]:

$$P_{ij}(p) = \frac{\prod_{n=1}^m (1 - L_k) \sum_{i=1}^{l_i} K_{ijk}}{\prod_{k=1}^m (1 - L_k)}, \quad (5)$$

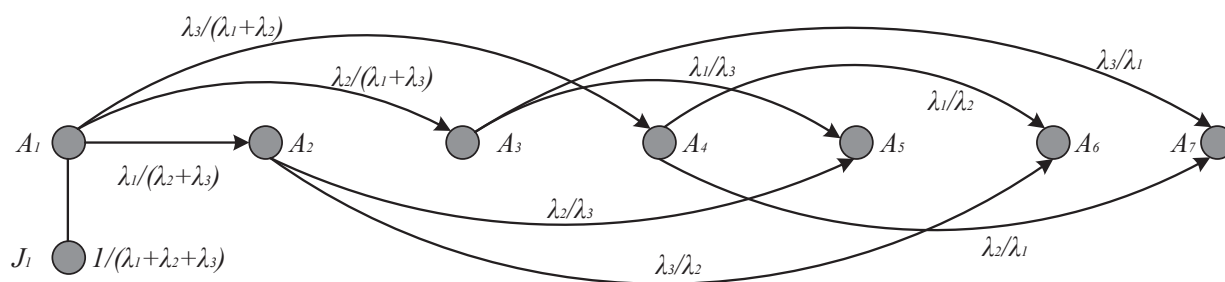
где  $L_k$  – передача  $K$ -го контура, имеющего начало и конец в одной вершине;  $K_{ijl}$  – передача пути  $l$  от  $i$ -ой дополнительной вершины к  $K_j$ -ой вершине;  $m$  – число контуров графа.

С учетом (1) уравнение (4) в матричной форме принимает вид [5]:

$$T = \bar{T}\Lambda + \bar{P}(0). \quad (6)$$

Уравнение (6) определяет среднее время безотказной работы и решается с помощью линейного графа. Причем установки и элементы ступенчатого иерархического ИИК могут находиться в двух состояниях: 1 – нормальное рабочее состояние ступени; 0 – отказная ступень.

При начальных и возможных комбинациях условий в соответствии с (5) 3-ступенчатый иерархический ИИК может находиться в семи состояниях  $A_1, A_2, \dots, A_7$ , а линейный граф системы соответственно будет иметь семь вершин состояний (рис. 1) [6]:



**Рис. 1. Линейный граф состояния ИИК с иерархической структурой для определения времени безотказной работы**

Раскрывая выражение (5) с учетом коэффициента  $k = \left[ \frac{\text{час}}{\text{км}} \right]$ , а также  $L_k$  – расстояния

от начала и конца каждой ступени системы в км, определяем время безотказной работы каждого перехода:

$$T_1 = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} = kL; \quad T_2 = kL \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_3}; \quad T_3 = kL \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_3}; \quad T_4 = kL \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2};$$

$$T_5 = kL \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_3} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_3} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_3} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \right); \quad T_6 = kL \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_3} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_2} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right);$$

$$T_7 = kL \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_3} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_1} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right).$$

Среднее время безотказной работы:

$$T_0 = \sum_{i=1}^k T_i \quad (7)$$

Учитывая (5) и (7), после математических преобразований получим:



$$T_0 = kL \left[ 1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_3} \cdot \left( 1 + \frac{\lambda_2}{\lambda_3} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_3} \cdot \left( 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_3} + \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \right) + \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \left( 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_3} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) \right], \quad (8)$$

где  $L_k$  – расстояние от начала и конца каждой ступени, км.

Так как центральный орган диагностирования и управления представляет собой 3-ю ступень и является самый надежным,

примем интенсивность его отказов  $\lambda_{цo}$  по сравнению с элементами нижних ступеней, то в соответствии [15; 16] можем принять  $\lambda_1 = a\lambda_2$ ,  $\lambda_2 = a^2\lambda_3$  тогда (8) примет вид:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda_{цo}(a^2 + a + 1)} \cdot \left( 1 + \frac{a}{a+1} \cdot \left( 1 + a + \frac{1}{a} \right) + \frac{a}{a^2 + 1} \cdot \left( 1 + a^2 + \frac{1}{a^2} \right) + \frac{1}{a^2 + a} \cdot \left( 1 + a + \frac{1}{a} \right) \right), \quad (9)$$

где  $\lambda_{цo} = \lambda_3$  – интенсивность отказов центральной ступени ИИК, равная  $\lambda_3 = 0.20 \frac{1}{год} \alpha$  – коэффициент надежности датчиковой измерительной аппаратуры, связи и обработки информации, который изменяется в пределах  $\alpha = (1 \div 4)$ . Для систем передачи железнодорожной технологической информации принимается  $\alpha = 1,3$  [4].

Количественный расчет среднего времени безотказной работы ИИК  $T_0$  получим, подставляя в (9) коэффициент надежности  $\alpha = 1,3$  и приведенную интенсивность отказов нижней ступеней  $\lambda_3 = \lambda_{цo} = 0,2$ , равную  $T_0 = 0,82$  год, что и определяет периодичность его технического обслуживания.

График зависимости относительного времени безотказной работы ИИК от значения коэффициента  $\alpha$ , построенный на основании (9), в обобщенных параметрах представлен на рисунке 2.

Анализ графика показывает, что относительное время безотказной работы ИИК сильно снижается при возрастании интенсивности нижних ступеней иерархии в полтора раза по сравнению с интенсивностью отказов центрального органа диагностирования и управления. Например, при  $\alpha > 4$  относительное время безотказной работы снижается незначительно.

Для оценки эффективности иерархической структуры необходимо сравнить надежность нижней структуры с надежностью централизованной системы (ЦС), а в качестве показателя надежности необходи-

мо использовать вероятность безотказной работы [6].

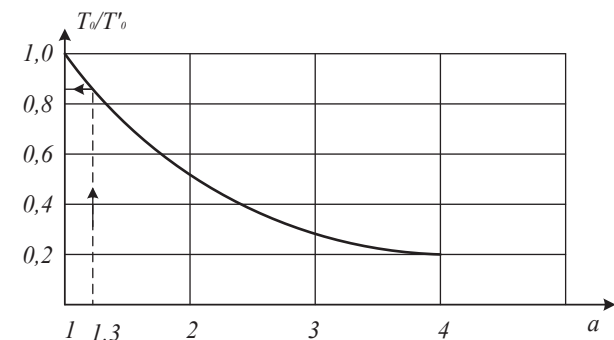


Рис. 2. График относительного времени безотказной работы ИИК от значения коэффициента  $\alpha$

Если в системе имеется  $n_1$  объектов управления нижней ступени, то ЦС будет содержать  $n_1$  линий связи, например между контактной сетью и центральным органом диагностирования и управления (ЦОУ). Так как измерительная информация передается последовательно, то надежность работы этой системы оцениваем по формуле умножения вероятностей [6; 7; 8]:

$$P_u(t) = P_{цo}(t) \cdot P_n(t), \quad (10)$$

где  $P_{цo}(t)$  – вероятность безотказной работы ЦОУ;  $P_n$  – вероятность безотказной работы линейной части ИИК, включая контактную сеть.

Надежность работы иерархической ИИК  $P_u(t)$  в целом оцениваем выражением [9; 10]:



$$P_u(t) = P_{uo}(t) \cdot P_{nl}(t) \cdot P_{no}, \quad (11)$$

где  $P_{nl}(t)$  – вероятность безотказной работы промежуточных линий связи;  $P_{no}$  – вероятность безотказной работы промежуточных устройств обработки измерительной информации.

Эффективность иерархической структуры по критерию надежности определяется с учетом (9) и (10):

$$P_u(t) = P_u(t), \quad (12)$$

Раскроем условие (12) через показатели элементов иерархической структуры. С учетом (6) имеем [6; 13]:

$$P_u(t) = \exp[-(\lambda_{uo} + n_{u1}\lambda_{lco})t], \quad (13)$$

$$P_u(t) = \exp[-(\lambda_{uo} + n_{ul}\lambda_{nl} + n_{no}\lambda_{no})t], \quad (14)$$

где  $\lambda$  и  $n$  – соответственно интенсивность отказов и число элементов обработки информации.

В общем случае количество промежуточных устройств измерений и обработки информации  $n_1$ , например для случая разветвленной структуры ИИК, определяется по геометрической прогрессии:

$$n_1 = k^{p-1}$$

где  $k$  – коэффициент ветвлений иерархической структуры ИИК;  $p$  – число ступеней ИИК.

Следовательно, количество промежуточных линий связи ( $n_l$ ) определяем как [12; 13]:

$$n_{nl} = \frac{k^p - k}{k - 1}. \quad (15)$$

Аналогично количество промежуточных объектов обработки измерительной информации находим как:

$$n_{no} = \frac{k^p - k}{k - 1}. \quad (16)$$

Учитывая наибольшую надежность центральной системы обработки диагностичес-

кой информации, через интенсивность отказов примем допущение:

$$n_{no} = \alpha\lambda_{uo}, \quad (17)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, определяющий надежность промежуточных объектов обработки по сравнению с ЦУО.

Для дальнейшего упрощения математических выражений, интенсивность отказов промежуточных линий связи выразим через интенсивность отказов централизованной системы обработки, т. е.:

$$\lambda_{nl} = \frac{\lambda_{ul}}{\nu}, \quad (18)$$

где  $\nu$  – коэффициент надежности для линий связи.

Коэффициенты, определяющие надежность промежуточных объектов обработки измерительной информации  $\alpha$  и линий связи  $\nu$ , определены соответственно в виде [4]:

$$\alpha = \frac{k^{p-1}(k-1) - \frac{1}{\nu}(k^p - k)}{\frac{\lambda_{uo}}{\lambda_l}(k^{p-1} - k)}, \quad (19)$$

$$\nu = \frac{k^p - k}{k^{p-1}(k-1) - \alpha \frac{\lambda_{uo}}{\lambda_l}(k^{p-1} - k)} \quad (20)$$

Графики  $a = f(k)$  и  $b = f(k)$  от коэффициента ветвлений  $k$  числа ступеней  $p$  представлены соответственно на рисунках 3 и 4.

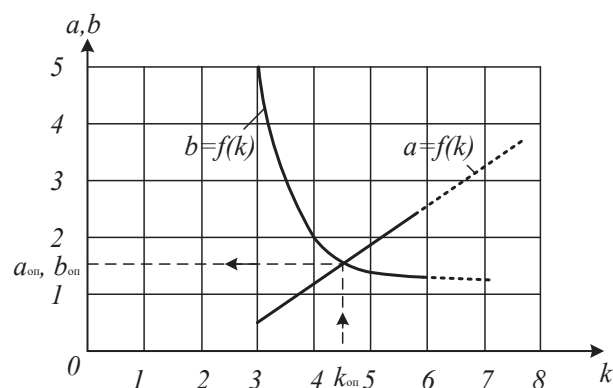


Рис. 3. График  $a = f(k)$  и  $b = f(k)$  для ИИК с иерархической структурой

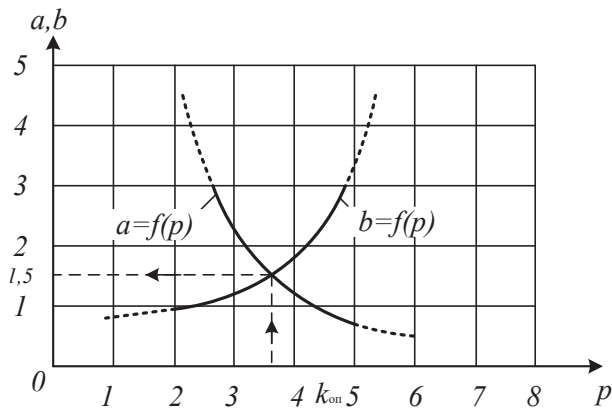


Рис. 4. График  $a = f(p)$  и  $b = f(p)$  для ИИК с иерархической структурой

На основе анализа графиков на рисунках 3 и 4  $a = f(k)$ ,  $b = f(k)$  и  $a = f(p)$ ,  $b = f(p)$ , построенных на основе (19) и (20) можно показать, что с ростом коэффициента ветвления  $k$  иерархической структуры допускается снижение требований к надежности промежуточных устройств обработки и соответствующих линий связи, а с увеличением числа ступеней  $p$  надежность промежуточных объектов и линий связи необходимо повышать.

Оптимизация структуры иерархической структуры с математической точки зрения представляет зависимость надежности от экономических показателей, т. е. экономические показатели являются ограничивающими переменными.

Средние потери, связанные с отклонением от эффективного управления вследствие отказа некоторых устройств промежуточной обработки в канале связи, характеризуются выражением:

$$\Pi = \mathcal{E} - \sum_{i=1}^k P_i \mathcal{E}_i, \quad (21)$$

где  $\mathcal{E}$  – эффективность применения ИИК при отсутствии отказов;  $\mathcal{E}_i$  – эффективность применения ИИК в  $i$ -ом состоянии при возникновении отказов;  $P_i$  – вероятность  $i$ -го состояния ИИК.

В относительных единицах указанные потери определяем как:

$$\delta_{\Pi} = \frac{\Pi}{\mathcal{E}} = 1 - \sum P_i q_i, \quad (22)$$

где  $q_i$  – весовые коэффициенты, учитывающие степень совершенствования отдельных установок ИИК.

Раскроем выражение (22) для централизованного уровня:

$$\delta_{\Pi} = 1 - n(P_{\psi} P_{\lambda} q_{\psi} - P_n q_n), \quad (23)$$

где  $n$  – число объектов обработки измерительной информации;  $P_{\psi}$  – вероятность безотказной работы центрального органа (ЦО) управления ИИК;  $P_{\lambda}$  – вероятность безотказной работы линий связи измерительной информации;  $P_n$  – вероятность безотказной работы объектов нижних ступеней;  $q_{\psi}$ ,  $q_n$  – соответственно весовые коэффициенты ЦО и нижних ступеней;  $n$  – число диагностируемых величин объектов или установок нижней ступени.

Учитывая  $q_{\psi} + q_n = 1$ , получим:

$$\delta_{\Pi} = 1 - n(P_{\psi} P_{\lambda} q_{\psi} + P_n (1 - q_n)). \quad (24)$$

Минимум относительных потерь обработки и передачи информации по линиям находим дифференцируя выражение (24) по  $q_{\psi}$  и приравнявая его к нулю, с учетом  $P = e^{-\lambda t}$  имеем:

$$\lambda_{\psi} + \lambda_n = \lambda_n, \quad (25)$$

где  $\lambda_{\psi}$ ,  $\lambda_n$  – соответственно интенсивность отказа центрального уровня обработки и соответствующих линий связи.

Минимальные потери информации централизованной системы при обработке и передаче информации по линиям связи и преобразователями 1-й ступени определяем как:

$$\delta_{\Pi} = 1 - [n(P_{\psi} q_{\psi} + P_n q_n) + \sum_{i=1}^k P_{\Pi_i} q_{\Pi_i} + \sum_{i=1}^k P_{\lambda_i} q_{\lambda_i}], \quad (26)$$



где  $q_{II}$  – весовой коэффициент промежуточных объектов обработки измерительной информации.

Аналогичным образом для трехступенчатой структуры имеем:

$$\delta_{II} = 1 - \{n[P_{II}q_{II} + q_{II}(P_{II} + P')]\} + \frac{n}{k}(P_{II}'' + P_{II}')q_{II} \quad (27)$$

где  $P_{II}'$ ,  $P_{II}''$  – соответственно вероятности безотказной работы линий связи от нижней (1-й) до средней (2-й), а также от средней (2-й) до (3-й) ступени.

### Выводы

В общем случае при известных числовых значениях надежности установленных объектов обработки измерительной информации в ИИК тягового электроснабжения по рассчитываемым относительным потерям, связанным с отклонениями от режима эффективного управления, целесообразно оптимально перераспределить выбранные первичные преобразователи и средства связи для установления минимальных потерь и

путем выбора оптимальной структуры ИИК. Применение векторов вероятностей технического состояния с использованием линейного графа позволяет определить время безотказной работы и других показателей надежности отдельно по каждому уровню и ИИК в целом.

Считаем целесообразным на основании результатов работы, основанной на выборе оптимальной структуры ИИК для диагностирования силовых объектов тягового электроснабжения, совмещенной с системой объектов тягового электроснабжения, совмещенной в свою очередь с системой оперативно-диспетчерского управления, с установкой дополнительной поперечной реактивной мощности предлагается повысить энерго- и ресурсосбережение грузопассажирских перевозок через железнодорожной тоннель «Камчик». В настоящее время грузы, превышающие 2,5 тыс. тонн, перевозят отдельно, что приводит к дополнительным потерям энергии и времени.

## REFERENCES

1. Belorusov A.V. Informacionno-izmeritel'nye i upravljajushhie sistemy [Information-measuring and control systems]. Lipetsk, Lipetsk Technical University Publishing House, 2010, 129 p.
2. Shkljar V.N. Nadezhnost' sistem upravlenija [Reliability of control systems]. Tomsk, TPU Publishing House, 2009, 126 p.
3. Shabanov V.A. Bashirov M.G., Hljupin P.A. Diagnostika tehničeskogo sostojanie jelektrooborudovanija sistem jelektrosnabzhenija: 24 metoda diagnostiki tehničeskogo sostojanija jelektrooborudovanija [Diagnostics of the technical condition of electrical equipment of power supply systems: 24 methods of diagnostics of the technical condition of electrical equipment]. Moscow, MPEI, 2018, 313 p.
4. Aleksandrovich A.E., Borodakij Ju.V., Chukanov V.O. Proektirovanie vysokonadezhnyh informacionno-vychislitel'nyh sistem [Designing highly reliable information and computing systems]. Moscow, Radio and communication, 2004, 144 p.
5. Borovich Z.I. Opredeliteli i matricy [Determinants and matrices]. Moscow, Nauka, 1998, 184 p.
6. Guk Ju.B., Karpov V.V., Lapidus A.A. Teorija nadezhnosti i jelektrojenergetike [Reliability theory and power engineering]. St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2009, 171 p.
7. GOST 27.301-95. Nadezhnost' v tehnike. Raschet nadezhnosti. Osnovnye položenija [Reliability in technology. Reliability calculation. Basic provisions]. Moscow, State. Published, 1995, 19 p.





8. Cao J.Y. Power supply system of electrified railway. Press of Chinese Railway, Beijing, 1983, pp. 106-109.
9. Li Q.Z., He J.M. Analysis of traction power supply system. Version III. Press of Southwest Jiaotong University, Chengdu, 2012, pp. 155-158, 59-267.
10. Li Q.Z., Lian J.S., Gao S.B. Electrified engineering of high speed railway. Press of Southwest Jiaotong University, Chengdu, 2006, pp. 155-166.
11. Li Q.Z., He J.M., Jie S.F. Analysis and control of power quality of electrified railway. Press of Southwest Jiaotong University, Chengdu, 2011, pp. 51-98.
12. Walter M. Power supply of electrified railway. Trans. Z.F. Yuan, He QG. Press of Southwest Jiaotong University, Chengdu, 1989, pp. 141-145.
13. Amirov S.F., Yakubov M., Turdibekov K.X., Sulliyev A.X. Resource-saving maintenance and repair of the traction transformer based on its diagnostics. International journal of advanced Science and technology, 2020, vol. 29, no. 5, pp. 1500-1504.
14. Li Q. New generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways. Mod. Transport, 2015, no. 23 (1), pp. 1-11. DOI: 10.1007/s40534-015-0067-1/.
15. Li Q.Z., He J.M., Li S.H. (1992) Study of the optimization design for traction power supply system. Southwest Jiaotong Univ., 1992, no. 27 (1), pp. 83-90.
16. Li Q.Z., Guo L., Shu Z.L. et al. On-line anti-icing technology for catenary of electrified railway. China Railw Soc., 2013, no. 35 (10), pp. 46-51.
17. Guo J.C. Research on power-supply technology applying on Shenshuo railway. Electr Drive Locomot, 2013, no. 4, pp. 47-50.

**Рецензент:** Баратов Р. Д., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и механика» Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства».