



doi <https://dx.doi.org/10.36522/2181-9637-2022-2-9>

UDC: 621.311; 629.423

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК САМОХОДНЫХ ПОДВИЖНЫХ СОСТАВОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Мухамедова Зиёда Гафуржановна,

доктор технических наук (DcS), и.о. профессора кафедры
«Транспортно-грузовые системы»,
Ташкентский государственный транспортный университет,
ORCID: 0000-0002-1825-2447, e-mail: mziyoda@mail.ru;

Мирсаитов Мирзиёд Мирозадович,

доктор философии по техническим наукам (PhD),
главный специалист управления развития регионов,
Министерство инновационного развития Республики Узбекистан,
ORCID: 0000-0003-3381-2147, e-mail: mirziyodmail@gmail.com

Аннотация. Статический анализ и оценка по результатам многолетних наблюдений действующей установки, прогнозирование и нормирование оптимальной надежности, рациональный выбор технических решений при их создании и эксплуатации является практической задачей вопроса надежности ССПС, связанных, как и в любых сложных технических объектах. Изложены анализ и оценка расчета надежности и выбора технических решений по ее обеспечению при эксплуатации электроустановок самоходных подвижных составов железной дороги. Рассмотрен пример решения практической задачи с использованием стандартных и специальных методов теории надежности и оптимальных решений. Определена математическая модель зависимости, которая позволяет прогнозировать надежность работы синхронного генератора автотриpsy при срабатывании начального ресурса для любых реальных условий эксплуатации и назначать оптимальную периодичность технического обслуживания.

Ключевые слова: электрификация, специальный самоходный подвижной состав, электроустановки, надежность, оценка.

Введение

Надежность электрифицированных железных дорог в общем и нетяговых установок типа самоходных подвижных составов (ССПС) в частности остается одной из самых главных проблем. Имеется очень много примеров выявления и устранения причин ненадежной работы ССПС, особенно его электроустановок вследствие недостатков проектно-конструкторских разработок, в которых не уделялось внимания анализу и оценке надежности. Этот вопрос касается и низкой квалификации обслуживающего персонала при их эксплуатации.

Как и в любых сложных технических объектах с вопросом надежности ССПС связаны следующие практические задачи: статический анализ и оценка по результатам многолетних наблюдений действующей установки, прогнозирование и нормирование оптимальной надежности, рациональный выбор технических решений при их создании и эксплуатации [1].



Особенностью анализа и оценки оптимальной надежности ССПС и его установок, в отличие от обычных объектов, является то, что сбор информации об этом объекте целесообразно начинать после первого капитального ремонта, так как ССПС имеют уникальную конструкцию и используются в небольшом количестве [2].

Z – число наблюдаемых N ССПС, вследствие экспоненциального закона распределения вероятности, целесообразно определять по формуле [2]:

$$\xi_{+1} = \frac{2N}{x^2(1-\beta; 2N)}, \quad (1)$$

где: $(1-\beta; 2N)$ – квинтели распределения χ -квадрата числа степени свободы N ; β – используемая доверительная вероятность в пределах 0,90 ... 0,95; δ – относительная ошибка.

$$\xi = \frac{(tB - tcp)}{tcp},$$

где: t^B , t_{cp} – соответственно верхняя доверительная граница и среднее значение исследуемой случайной величины или параметров.

N для необходимой вероятности $P(t)$ безотказной работы ССПС в течение заданного времени t с доверительной вероятностью β находится по формуле:

$$N = \frac{\ln(1-\beta)}{\ln P(t)}. \quad (2)$$

Также немаловажной особенностью является необходимость объединения статистических данных, собранных с различных регионов, для более точного определения показателей надежности и установления вида закона распределения случайных величин [3-5].

Материалы и методы

Учитывая вышесказанные обстоятельства по анализу надежности ССПС, необходимо рассмотреть многофакторный дисперсионный анализ, то есть методику влияния нескольких переменных на какой-либо вид случайной величины, определить

ТЕМИР ЙЎЛ МАХСУС ЎЗИЮРАР ХАРАКАТЛАНУВЧИ ТАРКИБЛАР ЭЛЕКТР ҚУРИЛМАЛАРИ ИШОНЧЛИГИНИНГ КЎП ОМИЛЛИ ТАҲЛИЛИ ВА УЛАРНИ БАҲОЛАШ

Муҳамедова Зиёда Гафуржановна,
техника фанлари доктори (DcS),
“Транспорт ва юк тизимлари”
кафедраси профессори в.б.,
Тошкент давлат транспорт университети;

Мирсаитов Мирзиёд Мирозадович,
техника фанлари фалсафа доктори (PhD),
Худудий ривожланиш бошқармаси
бош мутахассиси,
Ўзбекистон Республикаси Инновацион
ривожланиш вазирлиги

Аннотация. Операцион ўрнатишни узоқ муддатли кузатишлар натижаларига асосланган статистик таҳлил ва баҳолаш, оптимал ишончлиликни прогнозлаш ва нормаллаштириш, уларни яратиш ва ишлатиш жараёнида техник ечимларни оқилона танлаш ҳар қандай мураккаб техник объектларда бўлгани каби ССПС ишончлиги масаласининг амалий вазифаси ҳисобланади. Мақолада темир йўл ўзиюрар ҳаракатланувчи таркиблар электр қурилмаларидан фойдаланишда уни таъминлаш бўйича ишончлилик ҳисоблари, техник ечимларни танлашнинг таҳлили ва баҳоси келтирилган. Ишончлилик назарияси ҳамда оптимал ечимларнинг стандарт ва махсус услубларидан фойдаланган ҳолда, амалий масалани ҳал қилиш (ечиш) намунаси кўриб чиқилган. Ҳар қандай реал иш шароитлари учун дастлабки ресурсни йиғиш ва техник хизмат кўрсатишнинг оптимал частотасини белгилашда вагоннинг синхрон генератори ишончлигини тахмин қилиш имконини берадиган боғлиқликнинг математик модели аниқланган.

Калит сўзлар: электрлаштириш, махсус ўзиюрар ҳаракатланувчи таркиб, электр қурилмалар, ишончлилик, баҳолаш.

MULTIVARIATE ANALYSIS AND ASSESSMENT OF RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT OF SELF-PROPELLED ROLLING STOCK OF THE RAILWAYS

Mukhamedova Ziyoda Gafurzhonovna,
Doctor of Engineering (DcS), Acting Professor of the
Department of Transport and Freight Systems,
Tashkent State Transport University;

Mirsaitov Mirziyod Mirozodovich,
Doctor of Philosophy in Engineering Sciences (PhD),
Chief Specialist of the Regional Development
Department, Ministry of Innovative Development
of Republic of Uzbekistan



Abstract. *Static analysis and evaluation based on findings from long-term observations on operating equipment, forecasting and rationing of optimal reliability as well as the rational choice of technical solutions during their development and operation represent a practical challenge related to reliability of SSPS, as in any complex technical objects. The article presents the analysis and evaluation of calculation of reliability and the choice of technical solutions ensuring it during operations of electrical installations of self-propelled rolling stock of the railway. It also describes an example of solving a practical problem using standard and special methods of reliability theory and optimal solutions. A mathematical model of dependence has been determined, which allows predicting reliability of a synchronous generator of the automatic transmission when the initial resource is triggered for any real operating conditions and assigning optimal frequency of maintenance.*

Keywords: *electrification, special self-propelled rolling stock, electrical installations, reliability assessment.*

максимальное влияние уровня эксплуатации на показатели надежности ССПС, квалификации персонала, метеорологических условий регионов, а также эффективность технического обслуживания и режима эксплуатации.

Многофакторный дисперсионный анализ с инженерной точки зрения целесообразно определять в форме регрессионного анализа.

В силу того, что часть ССПС является сложной многоэлементной динамической системой, имеющей взаимозависимые входные и выходные величины металлоконструкционных, гидравлических и электромеханических установок, работающей в тяжелых эксплуатационных условиях, надежность ССПС в целом или его отдельной установки относительно известных законов представляет собой трудную задачу. Поэтому для анализа надежности ССПС воспользуемся статическими методами множественной регрессии, дающими возможность определять коэффициенты полинома как коэффициенты регрессии, связывающие выходные параметры Y и множество входных параметров X .

В данной работе статистические данные выбирались из множества наблюдений в ходе десятилетней эксплуатации ССПС АО «Узбекистон темир йуллари» в различных регионах, с учетом правил построения оптимальных планов для полных и дробных факторных элементов (табл.). Такое правило позволяет уменьшить среднеквадратическую ошибку оценок, получаемых с помощью полинома регрессии, и сократить число экспериментов [6].

Результаты исследования

Многофакторный эксперимент дает численную оценку каждой влияющей величины x на контролируемый параметр y . Отбрасывая члены полинома малости второго порядка, можем получить достоверную модель исследуемого объекта.

Основываясь на вышеуказанных положениях, рассмотрим прогнозирование параметра потока отказов для синхронного генератора (СГ) типа SECC 62-4У2, уставленного на автотомтрисе, для питания исполнительных двигателей механизма поворота площади монтажной, насоса гидравлики, механизма поворота крана и электрогидравлического толкателя.

Эксплуатационная надежность СГ определяется следующими факторами влияния [7]:

1) электрическая прочность изоляции статорной обмотки с учетом загрязнения. Верхний предел электрической прочности равен 2, нижний – 1,3;

2) максимальный ток короткого замыкания. Верхний уровень составляет 100% предельного тока отключения; нижний уровень – 50%;

3) недопустимая максимальная температура. Верхний уровень – 86 °С в течение 24 часов; нижний уровень – 20 °С;

4) допустимый эксцентритет ротора. Максимальный прогиб ротора в середине ротора – 0,5 см; минимальный прогиб – 0,3 см;

5) отключение СГ вследствие короткого замыкания исполнительных электродвигателей в течение года; верхний



уровень – 10 коротких замыканий и более;
нижний уровень – около 3 коротких замыканий;

б) число остановок СГ из-за отказов подшипников. Верхний уровень – 5 отключений, нижний уровень – 1 отключение.

Таблица

Характеристики факторных экспериментов

Номер опыта	Число отказов, м	Суммарная наработка S, год	Несмещенная интенсивность отказов, λ год ⁻¹	Смещенная наработка ΔS , год	Смещенная интенсивность отказов, λ год ⁻¹
1	5	232	0,0215	207	0,0241
2	11	402	0,0277	362	0,0304
3	7	133	0,0526	119	0,0588
4	3	121	0,0248	109	0,0275
5	1	132	0,0076	118	0,0084
6	9	374	0,0241	337	0,0267
7	1	196	0,0051	176	0,0057
8	3	98	0,306	88	0,0341

Сгруппировав данные эксплуатационной статистики, рассматриваемые для синхронного генератора по плану дробного факторного эксперимента [8], и предложив, что взаимосвязь перечисленных выше факторов не влияет на средний параметр потока отказов, получены результаты, приведенные в таблице 2.

$$\bar{\lambda} = 0,0324 - 0,005 \cdot x_3 + 0,0061 \cdot x_4 + 0,0111 \cdot x_5, \quad (6)$$

На основании среднего параметра потока отказов и с помощью полинома можно показать 95%-ную достоверность сравнения полученного и табличного значения по критерию Фишера, где $n = 8$ – число наблюдений; y – оценка.

При этом λ дает адекватное описание влияния сдерживающих факторов. Кроме того, по полученным данным можно рассчитать параметр потока отказов (6) эксплуатации СГ синхронного типа ЕСС-62-4У2, установленного на автотрисе АДМ-1, который определяется следующими факторами (в порядке убывания степени влияния): числом замыкания вследствие электрических цепей исполнительных двигателей, как показали наблюдения, преимущественно монтажного механизма поворота и насоса гидравлики, перегревом обмотки статора, из-за пере-

грузки (X4), а также отключения СГ вследствие неисправностей исполнительных электродвигателей (X3).

Значение влияющего фактора X5 стимулирует необходимость разработки и анализа математической модели отказа СГ для более глубокого анализа процесса прогнозирования надежности с целью его поэтапного оптимального профилактического обслуживания.

Надежность системы защиты и управления СГ во многом определяет локализацию отказов и восстановления нормального режима СПС. Для непосредственной оценки вероятности безотказной работы СГ рассмотрим простейшую из моделей, позволяющую сформулировать выводы в отношении его оптимальной профилактики [9].

Допустим, что за время t вероятность безотказной работы представляется произведением:

$$P(t) = P_0 \cdot P_1(t) \cdot P_2(t), \quad (7)$$

где P_0 , $P_1(t)$, $P_2(t)$ – вероятность безотказной работы внезапных отказов и отказов из-за короткого замыкания в самом СГ.

По данным статистики, вероятность отказа $Q(t'_0)$ СГ при начальном этапе эксплуатации из-за низкого качества изгото-



товления находится в пределах от 0,001 до 0,006. Поэтому для новых СГ вероятность безотказности можно принять равным $P_0 = 0,999...0,994$.

Известно также, что вероятность отсутствия внезапных отказов для электромеханических объектов изменяется по выражению:

$$P_1(t) = \exp(-\lambda t), \quad (8)$$

где λ – интенсивность отказов, определяемая с достаточной точностью на основе длительной эксплуатации.

При рассмотрении вероятности безотказной работы сумму вероятностей состояния от начального до N -го момента времени можно записать:

$$P(t) = \sum_{i=1}^N P_i(t). \quad (9)$$

Текущее i -е состояние характеризуется оставшимся ресурсом i и отработанным ресурсом $N - i$.

Дифференциальное уравнение для вероятности текущего состояния можно записать в виде:

$$P_i^1(t) = -\sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot P_j(t) + \sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot P_{i+j}(t), \quad (10)$$

где j – индекс параметра потока отработки j/N -й части начального ресурса.

На практике встречается необходимость рассмотрения вероятности безотказной работы во времени, когда имеющийся ресурс не равен N , тогда (9) и (10) преобразуются к виду:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t),$$

$$P_i^1(t) = -\sum_{j=1}^N \lambda_j \cdot P_j(t) + \sum_{j=1}^{N-1} \lambda_j \cdot P_{i+j}(t), \quad (11)$$

где n – отработанный ресурс.

Выводы

В заключение можно указать, что математическая модель зависимости $P_2(t)$ позволяет спрогнозировать надежность работы синхронного генератора автотрисы при отработке начального ресурса при любых реальных условиях эксплуатации и назначать оптимальную периодичность технического обслуживания.

REFERENCES

1. Mukhamedova Z.G., Yakubov M.S. Analysis of optimal periodicity of preventive maintenance of rail service car taking into account operational technology. *European Science Review*, 2018, pp. 167-171.
2. Mukhamedova Z.G. Mathematical model for calculation of oscillations in the main bearing frame of railcar with changing stiffness and physical parameters. *Journal of Siberian Federal University, Engineering & Technologies*, 2017, no. 10 (5), pp. 682-690.
3. Mukhamedova Z.G. Modeling of fluctuations in the main bearing frame of railcar. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 2016, vol. VIII, no. 2, pp. 48-53. ISSN 2067-3604.
4. Burkov A.T., Mirsaitov M.M. Modes of the electric traction network during the operation of electric locomotives VL80 -R and UTY-1. *Modern technologies for transport*, 2016, no. 2, 2016.
5. Burkov A.T., Mirsaitov M.M. Features of the methodology for determining power consumption when choosing the maximum speed of passenger trains. *Modern technologies for transport*, 2015, no. 1.



6. Brodsky V.V., Brodsky L.I., Goli T.I. Table of experimental plans for factorial and polynomial models. Moscow, 1990.
7. Instructions for the railcar. Diesel mounting ADM-1. Operating manual 77.020-00.00.000 OM JSC. Tikhoretsk Machine-Building Plant named after V.V. Vorovsky, 2003.
8. Ershevich V.V., Janiro I.M. et al. Handbook on the design of energy. Leningrad, Energoavtomisdat, 1985.
9. Guk Yu.B. Analysis of the reliability of electric power plants. Leningrad, Energoatomizdat, 1988.
10. System of equipment maintenance and repair. Basic provisions, State Standart 28001-83. Moscow, Publishing House of Standards, 1983, 23 p.
11. Reliability of engineering products. A system for information collecting and processing, methods for determining point estimates of reliability indices based on observation results, State Standart 17509-72. Moscow, Publishing house of Standards, 1983, 53 p.
12. Reliability in technology. Basic concepts. Terms and definitions, State Standart 27.002.-89. Moscow, Publishing House of Standards, 1990.
13. A collection of teaching aids for the control of electrical equipment. JSC Firm ORGRES ed. by F.L. Kogan, 1999, 428 p.
14. Diagnostics of products. General requirements, State Standart 27518-87. Moscow, Publishing House of Standards, 1988, 43 p.
15. Operation manual AC-AOG-01M. Research and Production Complex «Automated Systems», Rostov-on-Don, 2014, 23 p.
16. Voronin A.A., Mishin S.P. Hierarchical structures. Moscow, IPU RAS, 2003, 210 p.
17. Ovcharov V.V. Exploitation modes of operation and continuous diagnostics of electrical machines. Kiev, USHA publishing house, ISBN 5-7987-0044-5, 1990, 168 p.
18. Kudretsky B.Ya. Search for optimal solutions using EXCEL 7.0. St. Petersburg, 1997, 192 p.
19. Anderson R., Elkins J., Brickle B. Rail Vehicle Dynamics for the 21st Century. Eds. H. Aref, J. Phillips. Mechanics for a New Mellennium. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 113-126.

Рецензент:

Ишназаров О., д.т.н., заместитель директора по науке Института проблем энергетики АН РУз.