

УДК (UDC) 621. 31(075)

## RESOURCE-SAVING MAINTENANCE AND REPAIR OF THE TRACTION TRANSFORMER BASED ON ITS DIAGNOSTICS

Якубов М.С.<sup>1</sup>, Турдибеков К.Х.<sup>1</sup>, Суллиев А.Х.<sup>1</sup>  
Yakubov M.S.<sup>1</sup>, Turdibekov K.Kh.<sup>1</sup>, Sulliev A.Kh.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта  
(Ташкент, Узбекистан)

<sup>1</sup> – Tashkent Institute of Railway Engineers (Tashkent, Uzbekistan)

**Abstract:** Based on a generalized analysis of the compiled mathematical model of the maintenance and repair system of a traction transformer of an electrified railway, a resource-saving strategy is made based on the use of the results of technical diagnostics and providing the calculation of the optimal periodicity of the overhaul periods according to the values of the practical probability of failures, the number of factors wagging on Actual residual life and exploited in various operating conditions oviyah his work.

**Key words:** maintenance system technical diagnostics failure probability mathematical model

## РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ ТЯГОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ ЕГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

**Аннотация:** В работе на основе обобщенного анализа составленной математической модели системы техническом обслуживании и ремонта тягового трансформатора электрифицированной железной дороги сделан выбор ресурсосберегающей стратегии, основанного на использовании результатов технической диагностики и обеспечивающей расчет оптимальной периодичности межремонтных периодов по значениям практической вероятностей отказов, количества факторов, влияющих на фактический остаточный ресурс и эксплуатируемого в различных эксплуатационных условиях.

**Ключевые слова:** система технического обслуживания, техническая диагностика вероятность отказов, математическая модель.

Эффективность электроснабжения высокоскоростной железной дороги в условиях рыночной экономики зависит от того, насколько разрешена проблема выбора стратегии технического обслуживания и ремонта (ТОР) электрооборудования тяговых подстанций.

Тяговый трансформатор (ТТ) является одним из основных элементов системы электроснабжения. Он подвергается большому спектру отрицательно влияющих внешних и внутренних факторов, таких как несимметричность нагрузки, несинусоидальность напряжений и токов, относительно большой диапазон нагрузок в условиях резких метеорологических параметров, приводящих к изменению его теплового состояния, ухудшению электрической прочности и тангенса угла потерь твердой и жидкой изоляции, износов контактов РПН, понижению надежности средств релейной защиты и автоматики ТТ. В соответствии с требованиями нормативно-технической документации в системе тягового электроснабжения применяется стратегия планово-предупредительных ремонтов (ППР). Основным технико-экономическим критерием этой системы является минимум простоев электроустановок с применением строгой регламентации текущих и капитальных ремонтов.

Согласно утвержденных инструкций по техническому обслуживанию и ремонту, устанавливаются нормативы для каждого вида электрооборудования [1-4]. Согласно этих инструкций для всех видов электроустановок имеется типовые нормативы, касающиеся технического обслуживания и ремонта. Применение ППР является фактором рационального управления и прогноза надежности электроустановок как на краткий так и на длительный период стратегии ремонта. Но система ППР стала неадекватной изменившимся условиям функционирования электроснабжения и вошла в противоречие с рыночными механизмами производственно-хозяйственной деятельности объектов электроснабжения.

В условия рыночной экономики наиболее прогрессивной системой определения реального технического состояния является стратегия технического состояния (СТС), с использованием современных методов и средств технической диагностики, дефектоскопии и автоматизированного контроля с применением микропроцессорной техники.

Определение технического состояния тягового трансформатора в системе электроснабжения железных дорог чрезвычайно затруднена из-за необходимости сопоставления показателей разной физической природы и трудностью установления корреляционных зависимостей между ними. Это требует в качестве интегральной оценки технического состояния определять значение остаточного ресурса на основании результатов технического диагностирования с последующим переходом на календарное планирование.

Эта стратегия эффективна для ТТ, техническое обслуживание и ремонт которого связана с большими затратами с одной стороны и необходимостью обеспечения высоких показателей надежности с другой стороны.

В системе электроснабжения известна также стратегия аварийных ремонтов (САР) в котором практически не проводится ТОР, а аварийные ремонты осуществляются после отказа оборудования, что позволяет наиболее полно расходовать заложенный ресурс объекта, но она приводит к длительным остановкам технологического процесса [6, 7].

Однако, в каждом случае целесообразность стратегий ППР, СТС и САР должна определяться обобщенными сравнительными технико-экономическими расчетами. Поэтому актуальной задачей является разработка математической модели указанных стратегий, дающей возможность проводить анализ и выбор оптимальных периодичностей выполняемых ТОР по критерию минимума эксплуатационных затрат при максимальных показателях надежности оборудования системы электроснабжения с учетом ограничений по применению технических средств диагностирования.

При составлении математической модели оптимальной периодичности выполнения ТОР объекта должны быть учтены следующие положения: ресурс электрооборудования постепенно или дискретно понижается в процессе эксплуатации, объект подвергается техническому обслуживанию и диагностике, по результатам технической диагностики принимается решение об оценке технической состояния и показателей надежности ремонтов, определяется число заменяемых элементов, после отказа проводится аварийный ремонт, определяется трудоёмкость ремонта и затраты.

Анализ отказов тягового трансформатора ТТ показывает, что статистическая информация полностью отражает закономерность изменения его реального состояния и теоретически характеризуется функцией эксплуатационной вероятности отказов [8]:

$$Q(T)_1 = [1 - P_{\text{пос}}(T)][1 - P_{\text{вн}}(T)], \quad (1)$$

где  $P_{\text{пос}}(T)$ ,  $P_{\text{вн}}(T)$  - соответственно вероятность безотказной работы ТТ при постепенных и внезапных отказах;  $T$  - заданный период нормальной работы, при которой известны затраты и установлены периодичность текущих ремонтов.

В условиях реальной эксплуатации ТТ на железной дорог объем и виды статистики в большинства случаях неудобны для применения и в то же время ТТ как сложный объект с восстанавливаемыми элементами можно рассматривать на более высоком уровне как единый элемент. При определенных условиях, применяя метод наименьших квадратов, закон изменения в форме (1) можно привести к экспоненциальному закону в виде:

$$Q(T)_2 = 1 - \exp[-T\lambda_{\delta}R_{pi}], \quad (2)$$

где  $\lambda_\delta$  – базисная интенсивность отказов ТТ, обычно равная 0,001-0.0025,  $R_{pj} = R_{j\phi}/R_H$  – относительное изменение ресурса ТТ в случае эксплуатации его при  $j$ -х условиях и режимах работы;  $R_H$  – нормативный ресурс ТТ,  $R_{j\phi}$  – фактический остаточный ресурс ТТ в  $j$ -х условиях работы, определяемый результатами систем технической диагностики.

Найдем оптимальную периодичность текущего ремонта ТТ, по критериям которого выбирается функция минимума средних суммарных удельных затрат на эксплуатацию  $Z(T)$ . Целевая функция  $Z(T)$  при выполнении текущих ремонтов ТТ по указанным выше принципам учитывает реальное изменение технического состояния. Это состояние может иметь три составляющие затрат:

1. Средние удельные затраты  $Z_{\text{тор}}$  на ТОР и затраты  $Z_{\text{тд}}$  на техническую диагностику (ТД):

$$2. \frac{Z_{\text{тор}}}{T} Q(T)_2 + \frac{Z_{\text{тд}}}{T} Q(T)_2 = \frac{Z_{\text{тор}} + Z_{\text{тд}}}{T} Q(T)_2 \quad (3)$$

3. Средние удельные затраты  $Z_{\text{пр}}$  на исполнение предупредительных ремонтов:

$$Z_{\text{пр}} = \frac{Z_{\text{тор}}}{T} (Q)T \quad (4)$$

4. Средние удельные затраты на выполнение после аварийных ремонтов  $Z_{\text{па}}$ :

$$Z_{\text{уз}} = \lambda Z_{\text{па}}, \quad (5)$$

где  $\lambda = \lambda_\delta + \lambda_n$ ;  $\lambda_\delta$  – базисная интенсивность отказов, определяемая постепенными износами для силовых ТТ и равны 0,001-0,15;  $\lambda_n$  – переменная интенсивность отказов, обусловленная ложными действиями релейной защиты (РЗА), ошибками персонала и т.п.

Примем следующие обозначения:  $l$  – вероятность назначения ремонта по результатам ТД, а если ремонт не назначен то через  $m$ . В этом случае составляющие затраты на техническую диагностику (ТД) а также на предупредительный ремонт с учетом (3) будут определяться выражением:

$$Z^1(T) = m \frac{Z_{\text{тор}}}{T} Q(T) + (1-m) \frac{Z_{\text{пр}}}{T} Q(T) \quad (6)$$

Известно, что результаты комплексной ТД электрооборудования железнодорожного транспорта изменяют период текущих ремонтов, и следовательно после каждого ремонта интенсивность отказов будет иметь следующий вид:

$$\lambda = \lambda_\delta T^2 \quad (7)$$

Учитывая (6) и (7) составляющие затрат по результатам ТД объекта можно представить выражением:

$$Z''(T) = (1-m)Z_{\text{па}} + m\lambda_n Z_{\text{па}} = [\lambda - \lambda_\delta m]Z_{\text{па}} \quad (8)$$

Окончательно суммарные удельные затраты с учетом (6),(7),(8) будут определены в виде:

$$Z = Z'(T) + Z''(T)m \frac{Z_{\text{тор}}}{T} Q(T) + (1-m) \frac{Z_{\text{пр}}}{T} Q(T) + \lambda_\delta T^2 Z_{\text{па}} - \lambda_\delta m Z_{\text{па}} \quad (9)$$

Выражение оптимального межремонтного периода  $T_{\text{опт}}$  при эксплуатации ТТ вышеуказанными стратегиями ППР, СТС и САР определяется путем нахождения производной (9) и приравниванием его к нулю  $dZ(T)/dT = 0$ .

$$T_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{mZ_{\text{тор}}Q_k(T) + (1-m)Z_{\text{пр}}Q_k(T)}{2\lambda_\delta Z_{\text{па}}}} \quad (10)$$

При расчётах оптимальной периодичности по выражению (10) используется критическая эксплуатационная вероятность отказа  $Q_k(T)$ , в которой пользуются статические данные и результаты ТД в исходных данных (10)  $\lambda_\delta R_{j\phi}$  и  $R_H$  определяются на основе режимов работы ТТ в  $j$ -х условиях с применением средств диагностики [9].

Подставляя в (10) значением равные  $m=0$ , и 1, получим оптимальные межремонтные периоды  $T_{\text{опт}}$  соответственно по применению стратегии ППР:

$$T'_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{3_{\text{пр}}Q_k(T)}{2\lambda\delta 3_{\text{на}}}} \quad (11)$$

и по стратегии аварийных ремонтов (САР):

$$T''_{\text{опт}} = \sqrt[3]{\frac{3_{\text{тор}}Q_k(T)}{2\lambda\delta 3_{\text{на}}}} \quad (12)$$

С учетом того, с математическое ожидание вероятности проведения диагностирования  $N$ -ого элемента ТТ равна  $\eta_1$ , а также что вероятности диагностирования будут эффективными  $\eta_2$ , независимыми и распределенными равномерно, т.е.  $\eta_2 = \eta_1 = 0,5$ , получаем  $m=1-\eta_1\eta_2=1-0,25=0,75$  [8]. Подставляя это значение в (10) после математических преобразований получаем выражение для расчёта оптимальных межремонтных периодов по стратегии СТС с использованием ТД:

$$T'''_{\text{опт}} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 3_{\text{тор}}Q_k(T) + 3_{\text{пр}}Q_k(T)}{\lambda\delta 3_{\text{на}}}} \quad (13)$$

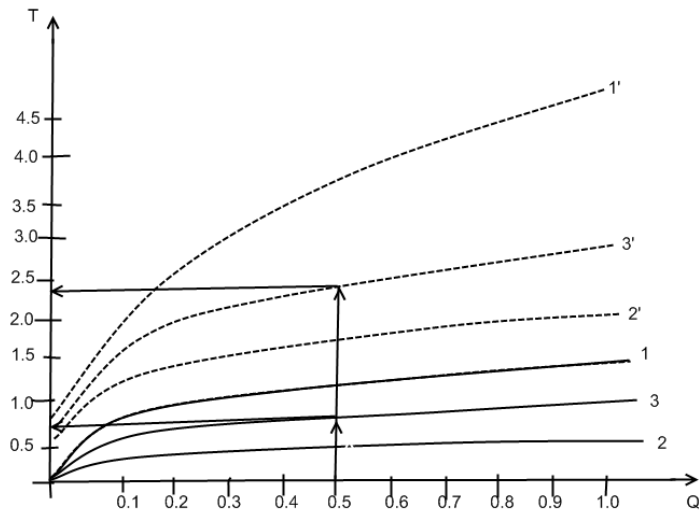
Определим выражения затрат  $3_{\text{тор}}, 3_{\text{пр}}, 3_{\text{на}}$ , позволяющих получить численные оптимальные значения межремонтных периодов с учетом всех затрат и влияющих факторов:

$$3_{\text{тор}} = \tau_{\text{тортд}}S_{\text{тор}}K_S, \quad (14)$$

где  $\tau_{\text{тортд}}$  – время в часах, требуемое для технического обслуживания и диагностирования, обычно выполняемое одновременно;  $S_{\text{тор}}$  – средняя заработная плата на техническое обслуживание и диагностирование;  $K_S$  – коэффициент, характеризующий начисление на заработную плату;

$$3_{\text{пр}} = \tau_{\text{пр}}S_{\text{пр}}K_S + V_{\text{пр}}, \quad (15)$$

где  $\tau_{\text{пр}}$  – время в часах требуемое для исполнения предупредительных профилактических ремонтов;  $S_{\text{пр}}$  – средняя зарплата на предупредительные профилактические ремонты;  $V_{\text{пр}}$  – затраты связанные с профилактические ремонтами и ущерб от простоев ТТ в ремонте. Средние затраты на технический осмотр и диагностику обычно составляют соответственно 1% и 5% от затрат на капитальный ремонт.



**Рисунок 1.** Кривые зависимости  $T_{\text{опт}} = f(Q)$  в относительных единицах для различных стратегий то тягового трансформатора с параметрами: пунктирные линии  $\delta=0,005$  и  $m = 0,50$  для стратегии 1' – ППР, 2' – САР, 3' – СТС; (сплошные линии)  $\lambda\delta = 0,15$ ,  $m = 0,75$  для стратегии: 1 – ППР, 2 – САР, 3 – СТС.

$$3_{\text{на}} = \tau_{\text{на}}S_{\text{на}}K_S + V_{\text{на}}, \quad (16)$$

где  $t_{па}$  – время в часах, требуемое для послеаварийного ремонта;

$S_{па}$  – средняя зарплата на выполнение послеаварийного ремонта,

$V_{па}$  – затраты на выполнение послеаварийного ремонта, простой ТТ и среднюю стоимость замененных элементов. Практически эти затраты превышают на  $\approx 10\%$  затраты на капитальный ремонт.

На рисунке 1 приведены кривые зависимостей  $T_{опт}=f(Q)$  в относительных единицах для различных стратегий ТОР и различных сочетаний исходных данных (рис. 1). Перевод в единицы времени можно выполнить как:  $T_{опт} \cdot t$ .

Анализ приведенных кривых с  $T_{опт}=f(Q)$  на рис.1 показывает, что на оптимальную периодичность ТОР прежде всего влияет базисная интенсивность отказов  $\lambda_б$ , фактический остаточный ресурс  $R_{фj}$ , определяющие критическую вероятность отказа и вид стратегий (ППР, САР и СТС). Как и ожидалось, применение стратегии ППР на железнодорожном транспорте приводит к наибольшей величине межремонтного периода. Величина межремонтного периода по СТС принимает промежуточные значения, лежащие между стратегией САР и стратегией ППР.

В заключении можно отметить, что предложенная математическая модель стратегии технического обслуживания и ремонта тягового трансформатора дает возможность определить оптимальные межремонтные периоды  $T_{опт}$  по значениям вероятностей отказа трансформатора, количества учитываемых факторов в функции, целей достоверности исходных данных, полученных с помощью средств диагностики, влияющих на фактический остаточный ресурс тягового трансформатора  $R_{фj}$ , эксплуатируемого в различных эксплуатационных условиях и режимах работы.

#### Литература

1. Juraeva K.K., Fayzullayev J.S. Mathematical models of magnetic circuits of sensors of functional diagnostic systems of electric carriers. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 2019. – P. 10-15.
2. Fayzullaev Z.S., Zhurayeva K.K. Study of magnetic circuits of sensors for diagnosing the electric mobile composition equipment. Journal Chemical technology. Control and management, 2019, №1 (85) 34-40 p.
3. Амиров С.Ф., Якубов М.С., Суллийев А.Х. Анализ динамических характеристик авторезонансных преобразователей неэлектрических величин. ЖурналТашГТУ «Проблемы энерго- и ресурсосбережения». – Ташкент, 2017. – №1/2. – С. 78-84.
4. Шабанов В.А., Баширов М.Г., Хлюпин П.А. и др. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения. Часть 2. Методы диагностики технического состояния электрооборудования. – М.: Издательства МЭИ, 2018. – 313 с.
5. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Диагностирование эксплуатационного режима тягового асинхронного электродвигателя. Известия АНРУз “Проблемы информатики и энергетики”, №4, 2018. – С. 33-41.
6. Якубов М.С., Файзуллаев Ж.С. Оптимизация периодичности технической диагностики обслуживания и ремонта тягового электрооборудования электровозов // Международный периодический журнал “Энерго и ресурсо сбережение”, 2018. – №6. – С. 24-32.
7. Амиров С.Ф., Жураева К.К. Турдибеков К.Х., Болтаев О.Т., Файзуллаев Ж.С. Магнитоупругий датчик усилий. Патент на изобретенный, №IAP 20180333. Агенств интеллектуальной собственности РУз.
8. Yakubov M.S, Mukhamedova S.G. Conteunons diagnostics of the state of the traction induction motor to based on the spectral analyses first current. 2018. – P. 86-92.
9. Yakubov M.S, Mukhamedova S.G. Analysis of optimal periodicity of the preventive maintenance of rail service captaining into account operational technology. Europen Science Revien 1-2. – 2018. – P. 167-171.
10. Якубов М.С, Мухамедова З.Г, Исроилов У.Ш., Файзуллаев Ж.С. Методологические аспекты непрерывного контроля диагностики тягового электрооборудования применением методов спетрального анализа // Международный периодический журнал “Химическая технология контроль и управление”. №3. – 2018. – С. 67-73.

### References

1. Juraeva K.K., Fayzullayev J.S. Mathematical models of magnetic circuits of sensors of functional diagnostic systems of electric carriers. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering, 2019. – P. 10-15.
2. Fayzullaev Z.S., Zhurayeva K.K. Study of magnetic circuits of sensors for diagnosing the electric mobile composition equipment. Journal of Chemical Technology. Control and management, 2019. – №1 (85). – P. 34-40.
3. Amirov S.F., Yakubov M.S., Sulliev A.Kh. Analysis of the dynamic characteristics of autoresonant converters of non-electric quantities. TashGTU Journal "Problems of Energy and Resource Saving". – Tashkent, 2017. – №1/2. – P. 78-84.
4. Shabanov V.A., Bashirov M.G., Khlyupin P.A. et al. Diagnostics of the technical condition of electrical equipment of power supply systems. Part 2. Methods for diagnosing the technical condition of electrical equipment. – M.: MEI Publishing House, 2018. – 313 p.
5. Yakubov MS, Fayzullaev Zh.S. Diagnosis of the operating mode of the traction asynchronous electric motor. Bulletin of ANRUZ "Problems of Informatics and Energy", №4. –2018. –P. 33-41.
6. Yakubov M.S., Fayzullaev Zh.S. Optimization of the frequency of technical diagnostics of maintenance and repair of traction electrical equipment of electric locomotives. International periodical journal "Energy and Resource Saving". №6. – 2018. – P. 24-32.
7. Amirov S.F., Zhuraeva K.K. Turdibekov K.Kh., Boltaev O.T., Fayzullaev Zh.S. Magnetoelastic force transducer. Invented patent, № IAP 20180333. Intellectual Property Agencies of the Republic of Uzbekistan.
8. Yakubov M.S., Mukhamedova S.G.. Conteunons diagnostics of the state of the traction induction motor to based on the spectral analyses first current. 2018. – P. 86-92.
9. Yakubov M.S., Mukhamedova S.G. Analysis of optimal periodicity of the preventive maintenance of rail service captaining into account operational technology. European Science Revien, 1-2. – 2018. – P. 167-171.
10. Yakubov M.S., Mukhamedova Z.G., Isroilov U.S., Fayzullaev Zh.S. Methodological aspect of continuous monitoring of traction electrical equipment diagnostics using spectral analysis methods. International periodical journal "Chemical Technology Control and Management". №3. – 2018. – P. 67-73.

#### Сведения об авторах / Information about the authors

**Якубов Миржалил Сагатович** – кандидат технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение железного дорог» Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта.

**Турдибеков Камолбек Хамидович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железного дорог» Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта.

**Суллиев Абсаид Хуррамович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение железного дорог» Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, E-mail: [absaid.sulliev@mail.ru](mailto:absaid.sulliev@mail.ru)

**Yakubov Mirzhalil Sagatovich** – PhD, department "Power supply of the railways" of the Tashkent Institute of Railway Engineers.

**Turdibekov Kamolbek Hamidovich** – PhD, department "Power supply of the railways" of the Tashkent Institute of Railway Engineers.

**Sulliev Absaid Khurramovich** – PhD, department "Power supply of the railways" of the Tashkent Institute of Railway Engineers, E-mail: [absaid.sulliev@mail.ru](mailto:absaid.sulliev@mail.ru)