

УДК 621.391.175

Канд. техн. наук Е. Е. БАКЕЕВ, инж. А. И. ШАРАПОВА

Оценка надежности и выбор стратегии профилактик оборудования тяговых подстанций с учетом степени износа

Аннотация. Существующая система организации испытаний и профилактических ремонтов ориентирована на эксплуатацию оборудования со сроком службы, не превышающим предельно допустимого. В результате аварийность тяговых подстанций с годами возрастает. Одной из причин является старение оборудования, что подтверждается статистикой на основе баз данных АСУЭ и КАСАНТ. Актуальной задачей является организация оптимального режима профилактик оборудования с учетом старения. Сложность проблемы заключается в том, что существующие методы диагностики не дают полной информации о надежности оборудования, поэтому необходимо найти оптимальную стратегию обслуживания при неполной информации о состоянии системы. В статье рассматривается задача выбора оптимального режима профилактик оборудования с учетом старения. Показано, что процесс, описывающий состояния системы, является регенерирующим, и поэтому средние удельные потери при «бесконечной» неопределенно длительной эксплуатации системы можно определить как отношение средних потерь за период профилактики к средней длительности этого периода. Приводится описание алгоритма формирования оптимального плана профилактик.

Для приближенного решения задачи неопределенно длительной эксплуатации системы может быть использована методика УРРАН, разработанная ОАО «НИИАС», которая базируется на составлении карт надежности оборудования.

Ключевые слова: надежность; тяговые подстанции; оценка ресурса; оптимальная стратегия обслуживания; срок и стоимость эксплуатации; алгоритм формирования плана; расчетный интервал

Эксплуатационная надежность тяговых подстанций существенно зависит от технического состояния их оборудования.

В настоящее время значительная часть оборудования тяговых подстанций имеет сроки службы, превышающие установленные нормативными документами, что необходимо учитывать при формировании планов профилактических и ремонтных работ.

Актуальность задачи очевидна из рассмотрения статистических данных на примере Московской железной дороги (табл. 1).

Как следует из табл. 1, более половины трансформаторов на тяговых подстанциях имеет срок службы больше нормативного 25 лет по ГОСТ 11677 – 85.

Существующая система организации испытаний и профилактических ремонтов ориентирована на эксплуатацию оборудования со сроком службы, не превышающим предельно допустимого. В результате аварийность тяговых подстанций с годами возрастает.

На рис. 1 представлены показатели аварийности тяговых подстанций (ЭЧЭ) сети железной дороги, взятые из базы данных автоматизированной системы управления электроснабжением (АСУЭ).

Надежность оборудования тяговых подстанций определяется степенью износа и старения за время эксплуатации.

Кривые снижения с течением времени надежности трансформаторов и фидерных выключателей приведены на рис. 2.

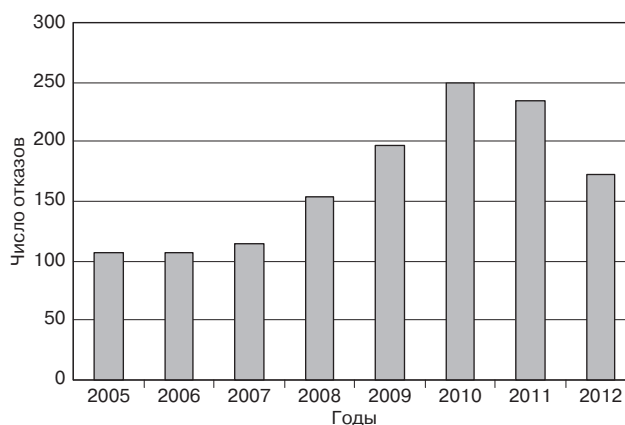


Рис. 1. Отказы тяговых подстанций

Таблица 1

Старение оборудования тяговых подстанций

Вид оборудования	Всего на дороге, шт.	В том числе со сроком службы более 25 лет	
		Количество оборудования, шт.	%
Выключатели 110 кВ	559	401	72
Выключатели 35 кВ	431	325	75
Выключатели 6 и 10 кВ	2040	1026	50
Выпрямительные агрегаты 3,3 кВ	353	221	63
Тяговые трансформаторы	476	167	35
Понижительные трансформаторы	217	167	77
Трансформаторы СЦБ	246	192	78
Трансформаторы собственных нужд тяговых подстанций	336	283	84

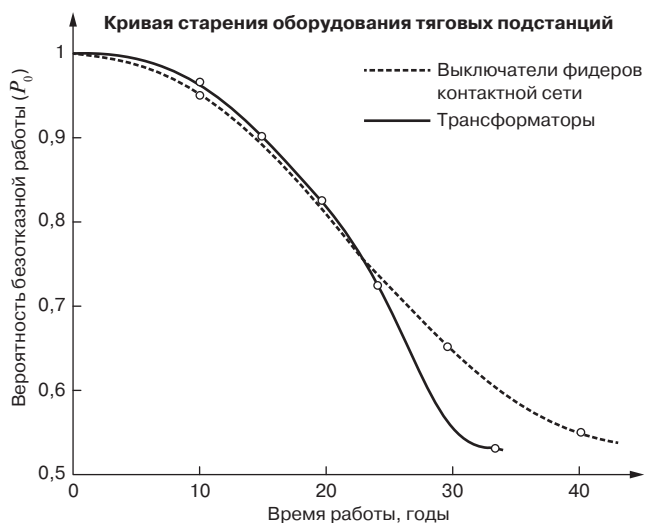


Рис. 2. Снижение вероятности безотказной работы оборудования тяговых подстанций при длительных сроках эксплуатации

Эти характеристики построены в результате обработки записей отказов из базы данных комплексной автоматизированной системы анализа неисправностей транспорта (КАСАНТ) по Московской железной дороге.

Как видим, после достижения предельного срока 25 лет уровень надежности падает ниже 0,75, что является недопустимо низким.

Эксплуатация такого оборудования строится на основе регулярных профилактических ремонтов, выполняемых через установленные нормативами интервалы времени t_0 .

На рис. 3 показан принцип продления срока службы оборудования за счет регулярных профилактических ремонтов. Но поскольку после каждого ремонта достичь уровня надежности $P_0 = 1$ практически нереально, то со временем огибающая кривая достигает критического значения $P_{кр}$, после которого оборудование следует менять на новое.

Такая система профилактик позволяет поддерживать в эксплуатации работу изношенного оборудования, но она связана со значительными трудозатратами

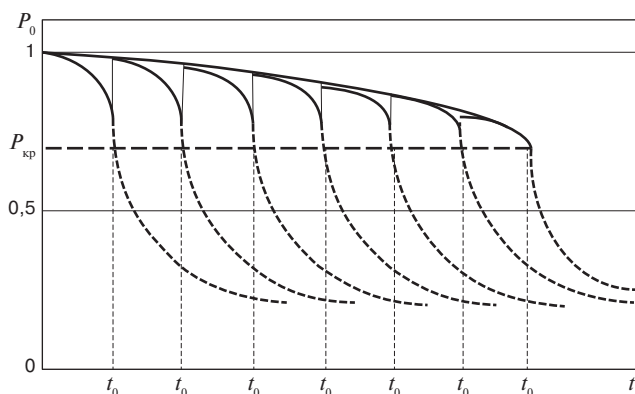


Рис. 3. Обслуживание с регулярными профилактиками

и удорожает стоимость содержания тяговых подстанций, не позволяя перейти к более экономичным методам их обслуживания.

С учетом изложенного очевидна актуальность изменения системы обслуживания тяговых подстанций.

Сложность проблемы заключается в том, что существующие методы диагностики не дают полной информации о надежности оборудования, поэтому необходимо найти оптимальную стратегию обслуживания при неполной информации о состоянии системы.

Если оборудование имеет возрастающую интенсивность отказов, т. е. является стареющим, то интервалы между профилактиками выбираются из условия $t_n \ll t_0$, где t_n — период профилактики, t_0 — время наработки на отказ.

Оптимальным будет такой режим, когда моменты профилактик не могут быть указаны заранее, а планируются в моменты времени, когда наработка оборудования с момента последнего включения достигла заданной величины.

Такой режим профилактики иногда называют профилактикой по возрасту или оперативной профилактикой (рис. 4).

Как показано в [1–10], оптимальным будет режим, при котором отказавшее устройство заменяют непосредственно перед моментом отказа, однако для этого необходимо иметь такую систему диагностики, которая позволит точно определять оставшийся ресурс оборудования.

Реально существующая ситуация с диагностикой позволяет иметь лишь относительную оценку ресурса, поэтому выбор оптимальной стратегии обслуживания может быть построен на основе вероятностных оценок.

Теоретическое обоснование решения подобной задачи приведено в [2].

Пусть один из периодов работы оборудования имеет длительность T и на этом интервале планируем n профилактик.

Обозначим среднюю стоимость проведения одной профилактики — c , а среднюю стоимость потерь за единицу времени пребывания оборудования в состоянии отказа — $c_{п}$.

Если отказ произошел после n -й профилактики, то общая стоимость S эксплуатации оборудования на этом интервале будет равна

$$S = nc + c_{п}\Delta t,$$

где Δt — время от момента возникновения отказа до выполнения очередной профилактики в момент T .

Обозначим через ξ случайное время до отказа оборудования между профилактиками с номерами k и $k+1$.

$$\text{Тогда } S(\xi) = (k+1)c + c_{п}(x_{k+1} - \xi) \text{ при } x_k < \xi < x_{k+1};$$

$$S(\xi) = nc + c_{п}(T - \xi) \text{ при } x_k < \xi < T.$$

При неопределенно длительной («бесконечной») эксплуатации системы средняя удельная стоимость ее эксплуатации определится следующим образом:

$$C_F(X) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{i=1}^{N(t)} S(X_i, \xi_i),$$

где $N(t)$ — число циклов профилактики, выполненных к моменту t ; $C_F(X)$ зависит от функции распределения $F(t)$ случайной величины ξ ; $S(X_i, \xi_i)$ — случайное время до отказа системы на интервале i .

При неполной информации о надежности системы мы полагаем, что нам известно только ее значение в точке T :

$$F(t) = P\{\xi < T\} = \pi \text{ при } T > 0,$$

где π — квантиль — допустимый уровень вероятности безотказной работы для распределения случайной величины ξ на интервале от $k = 0$ до $k = n$:

$$\pi = F(t) = F(X_{k+1}) = \sum_{k=0}^n P_k.$$

Очевидно, что математические ожидания S и X зависят от $F(t)$.

Процесс, описывающий состояния системы, является регенерирующим, и поэтому средние удельные потери при «бесконечной» неопределенно длительной эксплуатации системы можно определить как отношение средних потерь за период профилактики к средней длительности этого периода.

Выбирая оптимальный план профилактики, мы желаем минимизировать значение функции $\max C_F(X) = U$.

Алгоритм формирования оптимального плана в соответствии с [2] определяется следующим образом:

- введем обозначения $Q = \frac{c}{c_n T}$, $h_i = \frac{U_i}{c_n}$;
- значение оптимального числа n профилактик на интервале $(0, T)$ определяется численным приближенным решением уравнения

$$(1-h)^{n+1} = 1 - \pi - \pi Q \frac{1 - (1-h)^n}{h(h-nQ)}.$$

Это уравнение нельзя решить явно относительно h , но для заданной пары значений π и Q можно численными методами получить оптимальное значение n , соответствующее наилучшему плану профилактики.

При изменениях π от 0 до 1 параметр Q выбирается в диапазоне от 0,001 до 0,2. Выполняя рекуррентные расчеты при различных Q и π , определяем оптимальное значение n на расчетном интервале.

Достоверность результатов будет зависеть от объема статистических данных, характеризующих функцию $F(t)$, а следовательно, и $C_F(X)$.

Вид функции $F(t)$ может быть определен с использованием методик УРРАН, разработанных ОАО «НИИАС», которые базируются на составлении карт оценки надежности для каждого вида оборудования в зависимости от срока его эксплуатации.

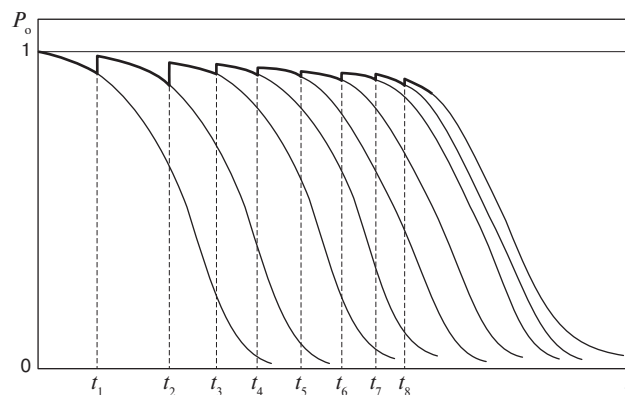


Рис. 4. Интервалы профилактики с учетом старения оборудования

Стоимость эксплуатации оборудования Θ может быть определена с учетом расходов на эксплуатацию p и потерь от аварий P :

$$\Theta = \frac{p + v(t)P}{t_0},$$

где $v(t)$ — вероятность отказа на интервале между профилактиками; t_0 — интервал времени между профилактиками.

Выбор интервала профилактики t_0 может быть сделан исходя из допустимых расходов на эксплуатацию [11] и уровня надежности оборудования:

$$t_0 = \frac{p + v(t)P}{\Theta}.$$

Очевидно, что при частых профилактиках стоимость эксплуатации возрастает, однако, с другой стороны, при этом снижается вероятность отказа $v(t)$, поэтому поиск оптимального режима профилактик является минимаксной задачей.

Вывод. Организация профилактик оборудования тяговых подстанций с учетом старения и фактического ресурса позволит сократить эксплуатационные расходы без снижения уровня надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герцбах И. Б. Модели профилактики. М.: Советское радио, 1969. 214 с.
2. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности системы. М.: Советское радио, 1975. 135 с.
3. Яхьяев Н. Я., Кораблин А. В. Основы теории надежности. М.: Академия, 2014. 256 с.
4. Острейковский В. А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2008. 463 с.
5. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 584 с.
6. Климов Г. П. Теория массового обслуживания. М.: МГУ, 2011. 312 с.
7. Кофман А., Фор Р. Займемся исследованием операций. М.: Мир, 1966. 278 с.
8. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание. Теория и приложения. М.: Мир, 1965. 302 с.
9. Риордан Дж. Вероятностные системы обслуживания. М.: Связь, 1965. 182 с.

10. Barlow R., Proshan F. Planned replacement. Studies in applied probability and management. Science, Stanford University press, Stanford 1962, pp. 63–87.

11. Crookes P. Replacement strategies. Operational Research Quarterly, 14, № 2, 1963, pp. 167–184.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАКЕЕВ Евгений Евгеньевич,

доцент кафедры «Электроэнергетика железнодорожного транспорта», ИТТСУ МИИТ.

127994, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.
Тел.: (916) 219-15-60.

E-mail: bakeeve@yandex.ru ✉

ШАРАПОВА Анна Игоревна,

конструктор МЭЗ ДКРЭ ОАО «РЖД»,
ассистент кафедры «Электроэнергетика
железнодорожного транспорта»,
аспирант ИТТСУ МИИТ.

109382, Москва, платформа Депо, д. 6, стр.1.

Тел.: (495) 351-27-64.

E-mail: sharap7@mail.ru

Reliability Evaluation and Preventive Maintenance Strategy Selection of Traction Substation Equipment Considering Its Wear Degree

Evgeniy E. Bakeev, Candidate of Technical Science, Associate Professor, Chair of Electrical Power Engineering on Railway Transport, Institute of Transport Equipment and Control Systems of Moscow State University of Railway Engineering. Building 9, 9 Obratsov str., 127994 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (916) 219 1560. E-mail: bakeeve@yandex.ru ✉

Anna I. Sharapova, Designer, Moscow Electromechanical Plant DKRE JSC RZD, Teaching Assistant, Chair of Electrical Power Engineering on Railway Transport, Institute of Transport Equipment and Control Systems of Moscow State University of Railway Engineering. Building 1, 6 stopping point Depot, 109382 Moscow, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 351 2764. E-mail: sharap7@mail.ru

Abstract. Existing testing and preventive maintenance pattern is meant for the equipment which actual term of service does not exceed the maximum allowable one. As a result traction substations' fault rate increases year on year. One reason for this proves to be ageing of equipment, which is supported with statistical data obtained from the data bases of Automated Power Supply Control System (ASUE) and Comprehensive Automated System for Record Keeping and Fault Elimination Monitoring of the JSC RZD Technical Facilities and Analysis of Their Reliability (KASANT). Today optimization of preventive maintenance pattern is a rather important task. It is a challenging task so far as the existing diagnostic techniques do not deliver complete information on the equipment reliability and it is necessary to find optimum maintenance strategy in terms of incomplete system condition data. The paper tackles the selection problem of optimum preventive maintenance pattern of traction substation equipment making allowance for its ageing. It is also indicated that the system states describing process is a regenerating one. That's why average unit losses in terms of unlimited ("endless") system service life can be defined by the ratio between the average losses over the inter-maintenance period and the length of this period. There is described algorithm for optimum schedule formation of the equipment preventive maintenance.

Approximate solution of the problem in terms of unlimited service life of the system can be obtained through use of the reliability mapping based URRAN procedure developed by the JSC NIIAS (Research & Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications on Railway Transport).

Keywords: reliability; traction substations; resource appraisal; optimum maintenance strategy; length and cost of operation; plan formation algorithm; calculated interval

References

1. Gertsbakh I.B. *Modeli profilaktiki* [Models of prevention]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1969. 214 p.
2. Barzilovich E.Yu., Kashtanov V.A. *Organizatsiya obsluzhivaniya pri ogranichennoy informatsii o nadezhnosti sistemy* [Service organization with limited information about the reliability of the system]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1975. 135 p.
3. Yakh'yayev N. Ya., Korablin A.V. *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory]. Moscow, Akademiya Publ., 2014. 256 p.
4. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability theory]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008. 463 p.
5. Greshilov A.A. *Matematicheskie metody prinyatiya resheniy* [Mathematical methods of decision-making]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 584 p.
6. Klimov G.P. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya* [Queueing theory]. Moscow, MSU Publ., 2011. 312 p.
7. Kaufmann A., Faure R. *Invitation a la recherche operationnelle* [Invitation to the operation research]. Dunod Orleans, 1966. 295 p. (Russ. ed.: Kofman A., For R. Zaymemya issledovaniem operatsiy. Moscow, Mir Publ., 1966. 278 p.).
8. Kaufmann A., Kryuon R. *Massovoe obsluzhivanie. Teoriya i prilozheniya* (transl. from French) [Queueing. Theory and applications]. Moscow, Mir Publ., 1965. 302 p.
9. Riordan J. *Stochastic service systems*. New York, Wiley Publ., 1962. 180 p. (Russ. ed.: Riordan Dzh. Veroyatnostnye sistemy obsluzhivaniya. Moscow, Svyaz' Publ., 1965. 182 p.).
10. Barlow R., Proshan F. *Planned replacement*. Studies in applied probability and management science. Stanford, Stanford Univ. Press Publ., 1962, pp. 63–87.
11. Crookes P. *Replacement strategies*. Operational Research Quarterly, 1963, vol. 14, no. 2, pp. 167–184.

ВЫШЛИ В СВЕТ ТРУДЫ ВНИИЖТ

Тюрнин П.Г., Тибилов А.Т., Миронос Н.В. Токосъем: надежность, экономичность и пути совершенствования. М.: ВМГ-Принт, 2015. 166 с.

В книге рассмотрены наиболее важные вопросы токосъема с учетом требований и методов проверки отдельных элементов контактной сети и токоприемников, эксплуатируемых при высокоскоростном движении. Подробно изложены отдельные решения экономичности и надежности устройств.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: железнодорожников, уже имеющих общую подготовку и практический опыт работы на контактной сети и в локомотивном хозяйстве, работников предприятий — изготовителей электроподвижного состава, а также преподавателей и студентов транспортных вузов, техникумов и колледжей.

По вопросам предварительного заказа на приобретение книги обращайтесь в редакционно-издательский отдел ОАО «ВНИИЖТ», тел. (499) 260-43-20.