

УДК 621.332(076.5)

А. Г. ГАЛКИН, А. А. КОВАЛЕВ (УРГУПС)

Уральский государственный университет путей сообщения, 620034, Россия, Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, тел.: +7 (343) 221-25-27, эл. почта: AGalkin@usurt.ru, AKovalev@usurt.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Введение

В настоящее время компания ОАО «РЖД» завершает одну из долголетних реформ. Ответственность за железнодорожные перевозки отдаются дочерним компаниям, в ведомстве ОАО «РЖД» остается инфраструктурный комплекс.

Основным приоритетом при эксплуатации железных дорог всегда выступала надежность и экономичность. Чтобы этого достичь, необходимы большие капиталовложения в научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

Мировой опыт развития железных дорог велик, рекорды скорости движения поездов в других странах достигают 500 км/ч, и, как следствие, можно приобрести новые технологии там. Тем не менее, отличительные климатические условия России не позволяют это сделать без дополнительной адаптации к местности и учета реальных нагрузок, действующих на контактную сеть, являющейся главной в этом процессе. На сегодняшний день отсутствуют инструменты, позволяющие принимать решения по конструкциям, их технической эксплуатации, ремонту и т.д. с учетом всего жизненного цикла.

Для развития высокоскоростного движения в России требуется применять новые организационные принципы, технологии и научно-технические решения создания контактной сети на всех стадиях жизненного цикла с обеспечением требуемого качества и сдачи в эксплуатацию контактной сети под ключ с гарантийными обязательствами на длительный период.

Поэтому необходим переход на новый уровень проектирования, производства и строительства высокоскоростных магистралей (ВСМ) на базе современных принципов управления жизненным циклом наукоемкой продукции.

Постановка задачи

Главная система, без которой не реализуемы проекты ВСМ, является контактная сеть. Она состоит из отдельных элементов: контактный провод, несущий трос, опора, консоль, фикса-

тор, струна, зажимы и др. Все они являются восстанавливаемыми объектами. Однако, далеко не всегда к ним может применяться допущение о полном восстановлении, но на небольших промежутках времени это вполне справедливо.

Основным показателем надежности элементов контактной сети является интенсивность отказов. Классическая кривая интенсивности отказов от времени состоит из трех участков: приработка – *I*, нормальная работа – *II* и деградация – *III* [1]. Для того чтобы уменьшить время приработки необходимо устранять выявленные недочеты на стадии проектирования и монтажа как можно раньше. Второй участок, соответствует нормальному режиму работы объекта. Отказы появляются, например, из-за неблагоприятных внешних факторов (климатические условия). На *III* участке кривой интенсивности начинают сказываться постепенные отказы, вызванные деградационными процессами (износом, старением, разрегулировками).

Определить временные границы указанных трех этапов для системы токосъема высокоскоростных магистралей, на сегодняшний день, возможно только путем моделирования, т.к. значения интенсивности отказов современных устройств контактной сети еще не известны.

В связи с этим необходимо разработать математическую модель, позволяющую оценивать срок жизненного цикла системы токосъема в зависимости от возникающих в ней нагрузок.

Решение задачи

Момент времени, в который начинается *III* период наработки на вновь проектируемом участке контактной сети, предлагается определить при помощи моделирования жизненного цикла системы.

Все это необходимо для выбора оптимального срока контракта жизненного цикла, заключаемого со специальной проектной компанией [2].

Отказ одного из элементов контактной сети может привести к ее отказу в целом, что в свою очередь приводит к задержке поездов, и соответственно к незапланированным расходам.

© Галкин А. Г., Ковалев А. А., 2013

Для установления причин отказа составим их классификацию (рис. 1) по 5 категориям: причине возникновения, характеру проявления, взаимосвязи, группам сложности и способу обнаружения.



Рис. 1. Классификация отказов

Основные элементы контактной сети можно отнести к восстанавливаемым объектам. На рис. 2 наглядно представлен процесс отказа и последующего восстановления одного элемента, входящего в состав единой сложной технической системы.

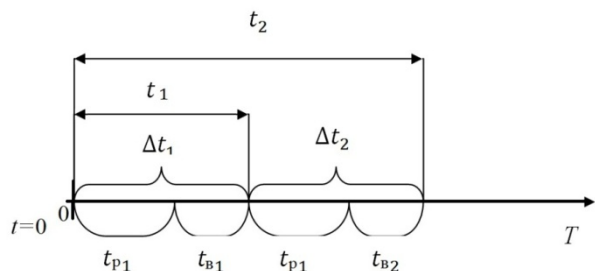


Рис. 2. Периоды работы восстанавливаемого объекта

Система начинает работать в момент времени $t = 0$ и продолжает работать до момента времени t_{p1} . После этого происходит восстановление объекта в течение времени $t_{в1}$. Затем система продолжит работать случайное время t_{p2} . Проработав некоторый промежуток времени, система (элемент системы) вновь выходит из строя в момент $t_{p1} + t_{в1} + t_{p2}$ и восстанавливается в течение времени $t_{в2}$.

Интервалы времени между отказами представляют собой систему взаимно независимых случайных величин [3]. Моменты отказов или восстановлений образуют в каждом опыте ряд чисел, которые образуют случайный поток, названный процессом восстановления. Данный процесс является различным для элементов и продолжается в течение жизненного цикла системы или элемента, входящего в него. Основной характеристикой процесса восстановления является функция восстановления $\Omega(t)$ и ее дифференциальная характеристика – плотность

восстановления $\omega(t)$, определяемые по следующим формулам:

$$\Omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(t), \quad (1)$$

$$\omega(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t), \quad (2)$$

где $f_n(t)$ и $F_n(t)$ – соответственно плотность и функция распределения наработки до n -го отказа.

В случае независимости наработок между отказами функции распределения $F_n(t)$ наработок до n -го отказа находятся путем последовательного применения правила свертки для суммы двух случайных величин:

$$F_n(t) = F_{n-1}(t) \cdot F(\Delta t_n) = \int_0^t F_{n-1}(t-\Delta t) \cdot dF(\Delta t), \quad (3)$$

Вычисление аналитических выражений для функции восстановления $\Omega(t)$ и плотности восстановления $\omega(t)$ невозможно из-за сложности математической формализации применяемых стратегий восстановления работоспособности технических систем и необходимости учета множества факторов, влияющих на замену элемента в системе. Свертка, приведенная в формуле (3) лишь для некоторых законов распределения вычисляется в конечном виде. В этих условиях наиболее эффективным методом расчета является метод Монте-Карло.

При эксплуатации контактной сети имеется возможность контролировать параметры и работоспособность ее объектов. Для аналитической связи характеристик, описывающих изменение параметров элементов, с показателями надежности предлагается применить модель отказа «параметр - поле допуска». Графическое изображение этой модели показано на рис. 3 [1].

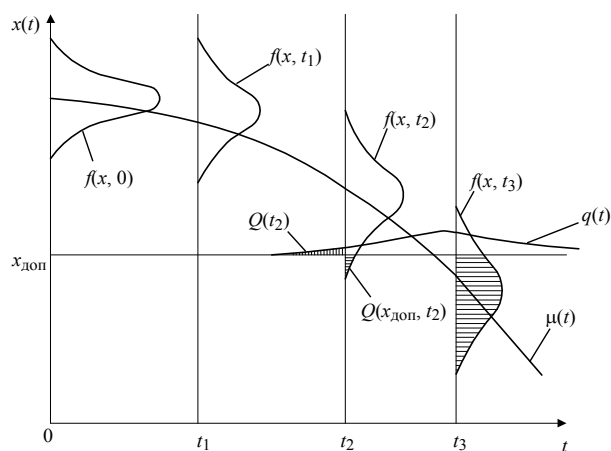


Рис. 3. Модель отказа параметр – поле допуска

Сделаем допущения, что:

- закон распределения параметра $f(x, t)$ во времени не изменяется;
- реализации $x_i(t)$ и моментные функции параметров плотности распределения $f(x, t)$ во времени изменяются монотонно;
- в начальный момент времени значения параметров находятся в границах поля допуска.

Тогда моментные функции параметров распределения $f(x, t)$ аппроксимируются зависимостями

$$\xi(t) = a + b \cdot t, \quad (4)$$

$$\xi(t) = a \cdot \exp(b \cdot t), \quad (5)$$

$$\xi(t) = a \cdot t^b, \quad (6)$$

$$\xi(t) = a \cdot \exp(b \cdot t) + c, \quad (7)$$

$$\xi(t) = a \cdot t^b + c, \quad (8)$$

где $\xi(t)$ – моментная функция некоторого параметра распределения $f(t)$;

a, b, c - коэффициенты регрессий.

Случайный процесс изменения параметра представлен сечениями, в которых располагаются кривые плотности распределения параметра в определенные моменты времени $f(x, t)$. Границы поля допуска могут задаваться как неслучайной величиной $x_{\text{доп}}$, так и случайными величинами $f(x_{\text{доп}})$, а также случайными процессами $f(t, x_{\text{доп}})$ (стационарными и нестационарными).

Наибольший интерес для практики представляет случай, когда изменение параметра описывается нестационарным случайным процессом, а граница поля допуска является неслучайной величиной. В этом случае граница поля допуска – предельная величина параметра, при которой объект становится неработоспособным.

Так, например, заявленный срок службы элементов контактной сети, согласно ПУТЭКС может быть один. В случае перехода к ВСМ, и повышению интенсивности движения поездов, увеличения нагрузки на всю системы граница поля допуска изменится.

Предложенную методику предлагается применять для определения срока службы новых конструкций контактной сети, которые будут применяться на скоростных и высокоскоростных участках с учетом изменения основных нагрузок.

Для того чтобы увеличить жизненный цикл всей системы, необходимо повысить надежность

приведенных выше устройств по отдельности. Обрыв струны в цепной подвеске и падение опоры с подвеской одинаково квалифицируются как отказ контактной сети. В первом случае возможен пропуск локомотивов с опущенным токоприемником, то во втором он приведет к задержке поездов, которые равны [4].

$$E_{\text{зад}} = N_{\text{зад}} \cdot c_{\text{по}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{зад}}$ – количество задержанных поездов;
 $c_{\text{по}}$ – величина приведенных затрат на остановку и задержку одного поезда на перегоне.

Основным критерием оптимальности является минимизация затрат на поддержание максимального срока службы объектов, при создании которых заключается контракт жизненного цикла.

В 2010 году в ОАО «Российские железные дороги» была развернута работа по гармонизации собственной нормативной базы с системой стандартов *RAMS*, широко применяемой на железных дорогах Евросоюза и Америки [5].

RAMS – это методология обеспечения безотказности (*Reliability*), готовности (*Availability*), ремонтпригодности (*Maintainability*) и безопасности (*Safety*) на железнодорожном транспорте. Представляет собой коллективный труд европейского сообщества, формализованный стандартами *EN 50126* и *IEC 62278*.

Изначальная направленность *RAMS* на производителей технических средств не удовлетворяла целям ОАО «РЖД», которые ориентированы на эксплуатационную деятельность. Это привело к необходимости разработки показателей эксплуатационной надежности и безопасности объектов железнодорожного транспорта, увязанных с объемами выполняемой эксплуатационной работы и созданию на их основе Российской методологии Управления ресурсами, рисками и надежностью на всех стадиях жизненного цикла (УРРАН). Дополнительно к показателям, используемым в методологии *RAMS*, в систему УРРАН были включены показатели долговечности (*durability*) и экономики (*economics*). В настоящее время разработка и внедрение системы УРРАН реализуется в рамках управления инфраструктурой.

Таким образом, в системе УРРАН объекты инфраструктуры оцениваются следующими ключевыми показателями:

а) долговечность:

– средним ресурсом;

б) безотказность:

– средней наработкой до отказа (для невозстанавливаемых элементов);

- средней наработкой на отказ (для восстанавливаемых элементов);
- интенсивностью отказов;
- в) готовность:
 - коэффициентом простоя;
 - г) ремонтпригодность:
 - средним временем до восстановления;
 - д) безопасность:
 - интенсивностью опасных отказов;
 - средней наработкой на опасный отказ;
 - е) экономика:
 - удельной трудоемкостью восстановления;
 - удельной трудоемкостью технического содержания;
 - фактическими удельными прямыми расходами на текущее содержание объекта инфраструктуры.

Надежность объектов инфраструктуры закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и «расходуется» при эксплуатации. Показатели системы УРРАН позволяют анализировать эффективность функционирования объектов инфраструктуры на всех стадиях жизненного цикла с различной глубиной детализации, включая планирование инвестиций. Данный анализ заключается в сопоставлении рассчитанных по результатам эксплуатации фактических показателей с показателями, рассчитанными при проектировании (так называемыми проектными) и с допустимыми показателями, установленными в соответствии с местными условиями.

Цель применения показателей УРРАН состоит в разработке и реализации конкретных мероприятий по управлению надежностью, безопасностью и ресурсами объектов инфраструктуры на различных стадиях жизненного цикла [6].

Методология оценки СЖЦ в хозяйствах электрификации и электроснабжения является инструментом, позволяющим принять экономически обоснованное решение при выборе альтернатив заключающихся в замене выработавшего назначенный производителем ресурс оборудования новым или обновлении, ремонте или продлении срока службы действующего оборудования.

В процессе оценки СЖЦ необходимо:

- определить состав и размер затрат жизненного цикла устройств, для которых возможно продление срока службы;
- сформировать перечень факторов, влияющих на СЖЦ и оценить количественные показатели степени их влияния;
- сформировать решающее правило для принятия решения о продлении срока службы

объекта электрификации и электроснабжения или его замене.

Затратами жизненного цикла объекта хозяйства электрификации и электроснабжения являются:

- затраты на приобретение и установку объекта (разработку и проектирование, материалы, логистику, строительство, наладку, тестирование);
- затраты на текущее обслуживание и ремонт объекта (проведение регулярных осмотров, заработная плата персонала материалы, транспортировка, затраты, связанные с технологическими окнами);
- затраты, связанные с отказами объекта (ущерб от опасных отказов, внеплановые ремонтные работы, простои поездов и возможные штрафные санкции, вызванные отказами, недополученная прибыль);
- затраты, связанные с утилизацией объекта.

Экономическое обоснование решения при продлении назначенного срока службы объекта состоит в сравнении экономического эффекта двух вариантов: с продлением срока службы объекта и без него (объект своевременно выведен из эксплуатации). Выбор осуществляется в пользу решения, при реализации которого ожидаются наименьшие затраты жизненного цикла объекта.

При продлении срока службы важно учесть следующие составляющие его СЖЦ:

- затраты на оценку фактического состояния (для устройств, допускающих продление назначенного срока службы в зависимости от фактического технического состояния);
- затраты на документальное оформление продления срока службы (для устройств, допускающих продление назначенного срока службы в зависимости от фактического технического состояния);
- дополнительную стоимость текущего содержания для устройств с продленным сроком службы (по сравнению с плановыми затратами на текущее содержание для устройств, назначенный срок службы которых закончился);
- дополнительную стоимость плановых ремонтов устройств с продленным сроком службы (по сравнению с плановыми затратами на плановые ремонты устройств, назначенный срок службы которых не закончился).

Принимая во внимание указанные составляющие, расчет экономической эффективности продления срока службы объекта, должно осуществляться на основании следующей функции [6]:

$$F = \overline{СЖЦ}_3 - (1 + k_{\text{мод}}) \cdot \overline{СЖЦ}_П,$$

где $\overline{СЖЦ}_3$ – среднегодовая стоимость жизненного цикла, руб.;

$\overline{СЖЦ}_П$ – среднегодовая стоимость жизненного цикла несущего троса в случае продления срока его службы, руб.;

$k_{\text{мод}} \in [0;0,2]$ – коэффициент модернизации, определяющий границы, в случае которых при незначительном преимуществе в пользу решения о продлении принимается решение о замене оборудования. Границы или значение данного коэффициента определяются на основе статистических методов Управлением электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД».

Решающее правило для принятия решения о продлении срока службы несущего троса, или его замене, выглядит следующим образом [6]:

1. Если $F > 0 \leftrightarrow$ продление срока службы экономически эффективно;

2. Если $F < 0 \leftrightarrow$ продление срока службы экономически неэффективно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Галкін О. Г. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання: навч. посібник / О. Г. Галкін, О. В. Ефимов, О. О. Матусевич, В. Г. Кузнецов. – Дн-ськ: Вид-во Маковецький, 2009. – 248 с.

2. Галкин А. Г. Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токопровода / А.Г. Галкин, А.А. Ковалев, А.В. Микава // Транспорт Урала. – 2012. – № 3 (34). – С. 85–90.

3. Бережная Е.В. Математические методы моделирования экономических систем: Учеб. пособие. / Е.В. Бережная, В.И. Бережной. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 432 с.

4. О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены сложных технических систем железнодорожного транспорта: распоряжение ОАО «РЖД» от 27 декабря 2007 г. № 2459р.

5. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте (редакция 1.1) / Утверждена старшим вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем. 2010 г. – 132 с.

6. Методика оценки эффективности продления срока службы основных средств хозяйства электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» на основе методологии УРРАН / Утверждена старшим вице-президентом ОАО «РЖД» В.А. Гапановичем. 2012 г. – 57 с.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Не всегда продление ЖЦ изделия будет залогом повышения качества. Для достижения экономического эффекта предлагается разрабатывать методы и технологии позволяющие прогнозировать срок службы контактной сети в целом, предлагать реальные варианты сокращения СЖЦ и тем самым повышать надежность всего инфраструктурного комплекса.

Выводы

1. Повышение надежности устройств контактной сети в связи с переходом на высокоскоростное движения является актуальной задачей.

2. Для прогнозирования срока службы всего инфраструктурного комплекса системы токопровода рекомендуется использовать математическое моделирование на основе параметрических моделей с учетом различных значений нагрузок.

3. Проводить необходимые расчеты и определять оптимальный срок контракта жизненного цикла ИКСТ необходимо с учетом методологии УРРАН, разработанной в ОАО «РЖД».

REFERENCES

1. Galkin O.G., Efimov O.V., Matusevitch O.O., V.G. Kuznetsov *Nadiynist i diagnostika pristroiv traction elektropostachannya: navch. posibnik* / - Dn-sk: Makovetsky Publ. – 2009. – 248 p.

2. Galkin A.G., Kovalev A.A., Mikava A.V. *Using lifecycle contract for infrastructure complex of current collection system* // Transport of the Ural. - Ekaterinburg, 2012. - № 3 (34). - P. 85-90.

3. Berezhnaya E.V., Berezhnoy V.I *Mathematical modeling of economic systems: Manual. allowance.* - 2nd ed., Rev. and add. – Moscow: Finance and Statistics, 2006. - 432 p

4. On the method of determining the value of the life cycle and the limit price of complex technical systems, rail transport: the disposal of ОАО "Russian Railways" dated December 27, 2007 number 2459r

5. The concept of integrated management of reliability, risk management, life cycle cost of rail (version 1.1) / Approved by the Senior Vice President of JSC «Russian Railways». V.A. Gapanovich. 2010. 132 p.

6. Methods of assessing the effectiveness of extending the life of the fixed assets management electrification and power supply JSC "Russian Railways" on the basis of the methodology Urra / Approved by the Senior Vice President of JSC "Russian Railways". V.A. Gapanovich. 2012. 57 p.

Поступила в печать 21.10.2013.

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

Жизненный цикл контактной подвески, как и любой другой сложной технической системы напрямую зависит от надежности ее составных частей. Преждевременный отказ одного элемента контактной сети может привести к отказу подвески в целом. Внедрение усовершенствованных узлов и деталей, а также применение более надежных и долговечных элементов контактной подвески, несомненно, увеличивает

жизненный цикл всего объекта. Тем не менее, при переходе к разработке проектов высокоскоростных магистралей, необходимо учитывать возникающие нагрузки, которых может не выдержать даже новейшее оборудование. В статье показаны основные математические выкладки, позволяющие спрогнозировать жизненный цикл изделий контактной сети на основе параметрической модели отказов, учитывающей возникающие нагрузки.

Ключевые слова: система токосъема, жизненный цикл, параметрическая модель, интенсивность отказов, контактная сеть, контракт жизненного цикла, срок службы.

УДК 621.332(076.5)

О. Г. ГАЛКІН, О. А. КОВАЛЬОВ (УРГУПС)

Уральський державний університет шляхів сполучення, 620034, Росія, Єкатеринбург, вул. Колмогорова 66, тел.: +7 (343) 221-25-27, ел. пошта: AGalkin@usurt.ru, AKovalev@usurt.ru

ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ МОДЕЛІ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ КОНТАКТНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЇХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Життєвий цикл контактної підвіски, як і будь-який іншої складної технічної системи безпосередньо залежить від надійності її складових частин. Передчасна відмова одного елемента контактної мережі може призвести до відмови підвіски в цілому. Впровадження удосконалених вузлів і деталей, а також застосування більш надійних і довговічних елементів контактної підвіски, безсумнівно, збільшує життєвий цикл всього об'єкту. Тим не менш, при переході до розробки проектів високошвидкісних магистралей, необхідно враховувати виникаючі навантаження, яких може не витримати навіть новітнє обладнання. У статті показані основні математичні викладки, що дозволяють спрогнозувати життєвий цикл виробів контактної мережі на основі параметричної моделі відмов, враховуючі виникаючі навантаження.

Ключові слова: система струмоміання, життєвий цикл, параметрична модель, інтенсивність відмов, контактна мережа, контракт життєвого циклу, термін служби.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 621.332(076.5)

A. G. GALKIN, A. A. KOVALEV (USURT)

Ural State University of Railway Transport, 620034, Russia, Ekaterinburg, 66 Kolmogorov Street, tel.: +7 (343) 221-25-27, e-mail: AGalkin@usurt.ru, AKovalev@usurt.ru

THE APPLICATION OF PARAMETRIC FAILURE MODEL OF THE CONTACT SYSTEMS ELEMENTS FOR PREDICTING THEIR LIFE CYCLE

The life cycle of overhead catenary, like any other complex technical system depends on the reliability of its constituent parts. Premature failure of one element of a contact network failure may result in the suspension as a whole. The introduction of improved parts and components, as well as the use of more reliable and durable elements of overhead catenary, of course, increases the life cycle of the entire facility. However, the transition to the development of high-speed railways projects, it is necessary to take into account the stresses arising, which cannot withstand even the newest equipment. The paper shows the basic mathematical calculations, allowing to predict the life cycle of the product contact network based on a parametric model of failure, taking into account the stresses arising.

Keywords: current collection system, life cycle, a parametric model, the failure rate, the contact network, the contract life cycle service life.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Lezhnyuk P. D.*