

УДК 004.942+656.25

П. Е. Булавский, д-р техн. наук**О. К. Ваисов**

Кафедра «Автоматика и телемеханика на железных дорогах»
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург

И. Н. Быстров

Санкт-Петербург-Витебская дистанция сигнализации,
централизации и блокировки, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПОИСКА И УСТРАНЕНИЯ ОТКАЗОВ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Проведены исследования оценки времени поиска и устранения отказов с учетом формализации технологических процессов поиска и устранения отказов технических средств систем железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью аппарата сетей Петри. Разработана упрощенная имитационная модель для оценки времени устранения отказа в СЖАТ путем анализа состояния технических средств, статистической и нормативной документации. Используются методы теории сетей Петри, которая базируется на дискретно-событийной парадигме ИМ, а также методика расчета времени на поиск и устранения неисправностей технических средств в СЖАТ. Проведен анализ нормативной документации, регламентирующей технологические операции по поиску и устранению отказов, в том числе предотказных состояний технических средств СЖАТ. Произведен анализ графика работы восстанавливаемых изделий. Выполнена формализация технологических процессов по поиску и устранению отказов в СЖАТ на базе методологии сетей Петри. Разработана упрощенная имитационная модель сетей Петри для оценки времени поиска отказов и их устранения. Анализ технических состояний СЖАТ на основе разработанной упрощенной модели сетей Петри для оценки времени поиска отказов и их устранения позволяет оценить среднее время их восстановления после неисправности.

отказ, предотказ технических средств, цветные временные сети Петри, маркировка, позиции, переходы, дуги, события, условия.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-4-478-492

Введение

Ежегодно ОАО «РЖД» предпринимает меры по уменьшению количества отказов за счет диагностики устройств автоматики и телемеханики. Для выявления отказов применяются различные системы, например аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля (АПК-ДК), автоматизированная система контроля подвижного состава (АСК-ПС), диспетчерская централизация (ДЦ) и т. д.

Организация устранения и расследования отказов технических средств, предотказных состояний устройств СЦБ первой категории критичности, неисправностей пути, требующих ограничения скорости или закрытия движения поездов, а также обеспечение требуемого уровня готовности и надежности участков инфраструктуры дороги регламентируется внутренними документами ОАО «РЖД».

В данной статье рассматриваются требования, предъявляемые к оценке времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики. На базе аппарата сетей Петри и имитационного моделирования с применением возможностей среды моделирования CPN Tools выполнена формализация технологических процессов поиска и устранения отказов и разработана модель оценки среднего времени восстановления систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ).

1. Отказ и его предупреждение

Рассмотрим два состояния объекта: предотказное и отказ. предотказное состояние – состояние объекта, характеризующееся повышенным риском его отказа. Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта [1]. В [2] этому термину дано другое объяснение, точнее описывающее данное состояние: объект находится в предотказном состоянии в том случае, когда хотя бы один из его параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, достигает граничного значения, определенного нормативно-технической и (или) конструкторской документацией, при котором не может быть гарантирована работоспособность при дальнейшем изменении параметра. Не допустить отказ можно за счет диагностики. Так, система АПК-ДК может проводить измерения параметров основных элементов автоматики и телемеханики и на основании полученной информации сделать вывод о состоянии объекта.

Перечень основных предотказных состояний устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) регламентируется внутренними документами ОАО «РЖД».

Расчет времени, необходимого для устранения нарушения нормальной работы устройств, должен производиться с учетом следующих требований:

– на железнодорожных линиях I, II класса и отдельных участках железнодорожных линий III класса к работам по устранению отказов и предотказов приступают непосредственно после их обнаружения;

– на железнодорожных линиях III класса и отдельных участках железнодорожных линий IV класса к работам по устранению отказов приступают непосредственно после их обнаружения. Работы по устранению предотказных состояний выполняются в плановом порядке исходя из местных условий;

– на железнодорожных линиях V класса и отдельных участках железнодорожных линий IV класса работы по устранению отказов и предотказов выполняется в плановом порядке исходя из местных условий [3, 4].

В дистанциях инфраструктуры для совместного выполнения работ по обслуживанию и ремонту устройств инфраструктуры создаются комплексные бригады, состоящие из специалистов хозяйства пути, электроснабжения, автоматики и телемеханики. На рис. 1 изображен временной график работы восстанавливаемых изделий. Предположим, что все отказы и восстановления элементов СЖАТ обозначаются совокупностью точек на оси времени, тогда интервалы времени между точками означают независимые одинаково распределенные случайные величины. Совокупность всех точек в целом образует случайный процесс.

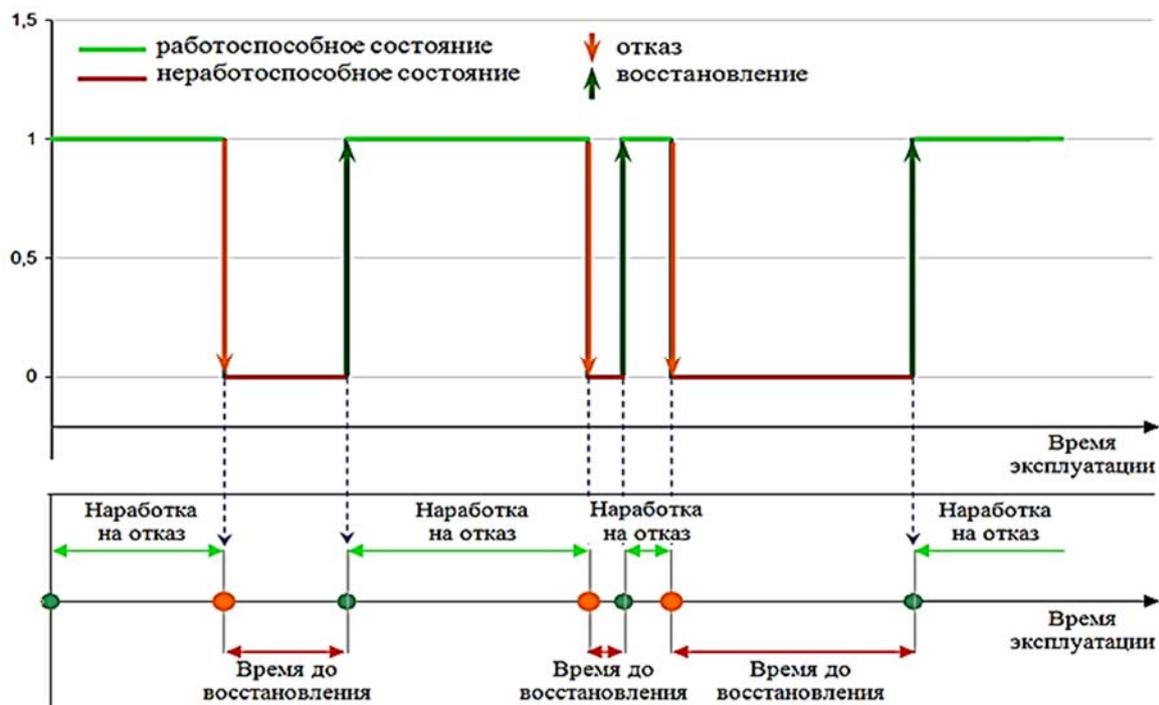


Рис. 1. Временной график работы восстанавливаемых изделий

Таким образом, интервал времени между точкой восстановления работоспособного состояния (точкой восстановления) и точкой возникновения неработоспособного состояния (точкой отказа) называется наработкой СЖАТ на i -й отказ. Интервал времени между точкой отказа и точкой восстановления состояния СЖАТ называется временем до i -го восстановления системы.

2. Методика расчета времени поиска и устранения неисправности

Согласно [5], расчет времени, необходимого для устранения нарушения нормальной работы устройств инфраструктуры, должен производиться для каждого вида технических средств индивидуально, в зависимости от их расположения (станция, перегон), наличия постоянного дежурства и места жительства эксплуатационного персонала, а также факторов, влияющих на время доставки персонала и запасного оборудования. Время устранения отказов технических средств с момента получения сообщения о появлении нарушения нормальной работы устройств от систем ДЦ, ДК, СПЛ-ЛП, АСК-ПС, ДСП, ДНЦ, машиниста поезда, дежурного по переезду, работников хозяйств автоматики и телемеханики, пути, электроснабжения и т. д. определяется как

$$T_{\text{уст}} = \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i – обозначение времён, необходимых для следующих действий:

- уведомления и доставки работников соответствующих служб (хозяйств) к месту неисправности технических средств;
- доставки, при необходимости, из страхового (аварийно-восстановительного) запаса требуемого оборудования, аппаратуры и материалов;
- оформления необходимых действий для устранения неисправностей технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств СЦБ;
- проведения и оформления инструктажа по охране труда;
- поиска и определения причины отказа;
- формирования и передачи сообщения о порядке пользования устройствами и организации движения поездов на период устранения нарушения нормальной работы устройств инфраструктуры;
- устранения неисправностей технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры (определяется по каждому виду устройств);

– проверки действия устройств инфраструктуры после устранения неисправностей технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры;

– передачи и оформления сообщения об устранении неисправности технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры.

В соответствии с [6] среднее время собственного восстановления неисправностей технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры, является наиболее обобщающим критерием ремонтпригодности устройств. Оно складывается из следующих составляющих: времени оповещения причастных работников об отказе t_o , времени следования к объекту отказа $t_{пр}$, времени поиска места отказа $t_{п}$, времени устранения t_y , то есть:

$$T_v = t_o + t_{пр} + t_{п} + t_y. \quad (1)$$

Работники, участвующие в устранении нарушений нормальной работы технических средств, должны быть обеспечены средствами обнаружения, поиска и устранения неисправностей, нормативными документами, необходимыми для оформления записей по устранению нарушений нормальной работы устройств СЦБ, необходимыми средствами доставки персонала и резервного оборудования к месту нарушения нормальной работы устройств СЦБ. При вызове на устранение неисправностей устройств СЖАТ работники дистанции обязаны руководствоваться «Регламентом нарушений нормальной работы устройств СЦБ, АЛСН, САУТ». Требования регламента обязательны для исполнения работниками ШЧ, перевозок, пути и искусственных сооружений, электрификации и электроснабжения, а также другими лицами, участвующими в процессе определения причин и устранения нарушений нормальной работы устройств СЦБ.

3. Формализация поиска и устранения отказов с помощью методологии сетей Петри

Сети Петри являются удобным математическим аппаратом для формализации, анализа и моделирования дискретно-событийных систем [7, 8]. Из-за слабосвязанной многоуровневой структуры сети Петри могут использоваться для эффективного моделирования различных технологических процессов [9], а также методология сетей Петри широко используется для обнаружения неисправностей и диагностики дискретно-событийных систем [10, 11].

Структура сети Петри определяется ее позициями, переходами, входной и выходной функциями.

В соответствии с [12] по определению классическая сеть Петри C является четверкой:

$$C = (P, T, I, O),$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $n \geq 0$, – конечное множество позиций; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, $m \geq 0$, – конечное множество переходов; множество позиций и множество переходов не пересекаются, $P \cap T = \emptyset$; $I: T \rightarrow P^\infty$ является входной функцией – отображением из переходов в комплекты позиций; $O: T \rightarrow P^\infty$ есть выходная функция – отображение из переходов в комплекты позиций.

Мощность множества P есть число n , мощность множества T есть число m . Произвольный элемент P обозначается символом p_i , $i = 1, \dots, n$, произвольный элемент T – символом t_j , $j = 1, \dots, m$.

Маркировка μ есть присвоение фишек позициям сети Петри. Фишка – это примитивное понятие сетей Петри. Фишки присваиваются позициям, и их движение наглядно показывает выполнение множества условий срабатывания. Таким образом, маркировка μ есть функция, отображающая множество позиций P во множество неотрицательных целых чисел N :

$$\mu: P \rightarrow N.$$

С учетом разметки позиций (маркировки) сети Петри задаются выражением

$$C_\mu = (P, T, I, O, \mu). \quad (2)$$

Моделирование системы сетью Петри основано на двух основополагающих понятиях: событиях и условиях. Под событием понимаются действия, имеющие место в системе. Возникновением событий управляет состояние системы. Состояние системы описывается множеством условий. Условие может принимать либо значение «истина», либо значение «ложь» [13]. Таким образом, модель на базе сети Петри служит для отображения и анализа причинно-следственных связей поиска неисправностей в устройствах систем СЖАТ. Анализ результатов моделирования предполагает определение времени поиска, устранения и замены отказавшего элемента устройств СЦБ. Введение ряда дополнительных правил и условий в алгоритмы моделирования позволяет получать ту или иную разновидность сетей Петри. Для того чтобы моделировать не только последовательность, но и время технологических операций по поиску отказов и их устранению, необходимо осуществить привязку событий к времени. Это осуществляет-

ся приданием переходам веса – продолжительности (задержки) срабатывания, которую можно определять, используя задаваемый при этом алгоритм. Полученную при таком способе модель называют временной сетью Петри (ВСП).

4. Моделирование поиска неисправностей устройств СЦБ на временных сетях Петри

Для исследования вопроса оценки времени поиска и устранения отказов в СЖАТ предложена упрощенная имитационная модель, построенная посредством аппарата временных сетей Петри, что позволяет провести анализ поведения системы при ее функционировании. Формализм сетей Петри дает возможность применять аналитические методы как для анализа исполнения, так и для верификации логических свойств исследуемых процессов, а также требует точных определений, исключающих неопределенности и противоречия [14].

Для оценки времени восстановления СЖАТ при поиске и устранении неисправностей устройств СЦБ используется сеть Петри с временными ограничениями (ВСП). Реальные технологические процессы имеют конечную продолжительность, что может быть изображено графически на временных графиках. ВСП – это двудольный ориентированный граф, дополненный характеристиками дуг и вершин, которые представлены натуральными числами [15]. ВСП в отличие от простых сетей Петри расширяются путем введения множества времени задержек срабатывания переходов: $\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j\}$ – множество времени задержек для переходов.

После расширения сети Петри задается следующим выражением:

$$C_{\mu} = (P, T, I, O, \mu, \tau). \quad (3)$$

В результате получаем временные сети Петри с детерминированными задержками, которые являются одним из известных расширений базовых сетей Петри, используемых для моделирования систем и процессов, при анализе которых необходимо учитывать не только порядок выполнения действий, но и временные характеристики [16, 17].

В качестве объекта моделирования оценки поиска неисправностей устройств СЦБ рассмотрим случаи нарушения работы устройств в ЭЦ.

Рассмотрим формализацию указанного выше процесса по поиску неисправностей и восстановления работоспособности устройств СЦБ (моделирование времени восстановления).

Сформулируем задачу моделирования как оценку времени выполнения технологической операции по поиску отказов и их устранению. Наличие фишек на определенных позициях будет означать существование соот-

ветствующего задания или запроса на выполнение операций, необходимых для устранения неисправностей устройств СЦБ (рис. 2), в сети Петри содержится 8 позиций и 5 переходов:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8\};$$

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}.$$

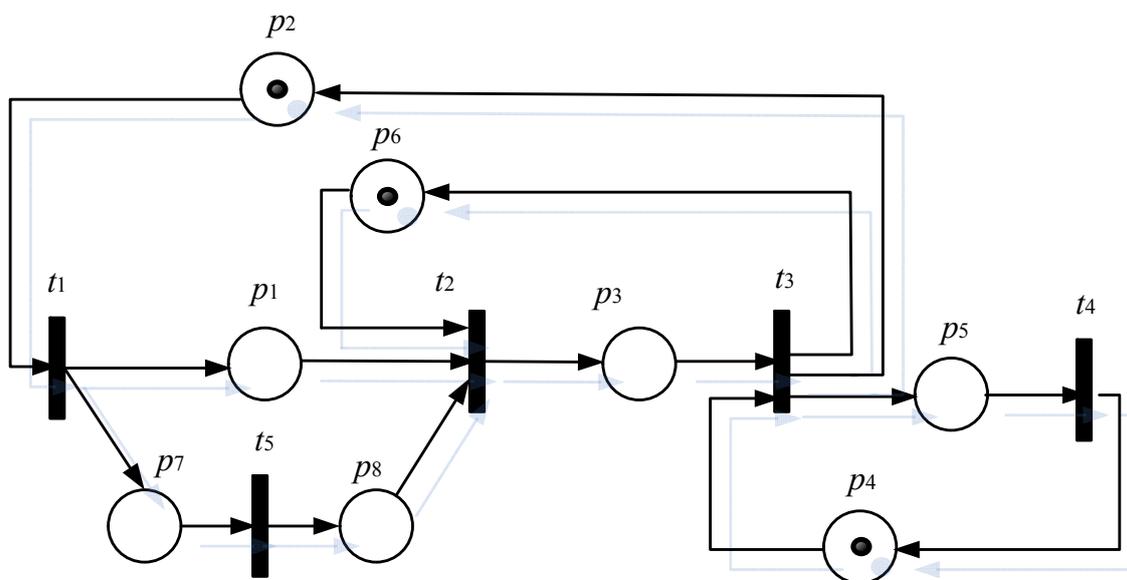


Рис. 2. Упрощенная модель сетей Петри для оценки времени поиска отказов и их устранения

Входные и выходные функции сети Петри, представленной на рис. 2, определяются следующим образом:

$$I = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

$$O = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

При проведении эксперимента использовались средние статистические данные, приведенные в [18, 19], (табл. 1). На разработанной упрощенной имитационной модели при заданных значениях продолжительности этапов реализации технологических операций по поиску отказов и их устранению можно оценить среднее время восстановления устройств СЦБ. Дерево достижимости модели представлено на рис. 3, оно описывает все возможные последовательности срабатывания переходов сети Петри.

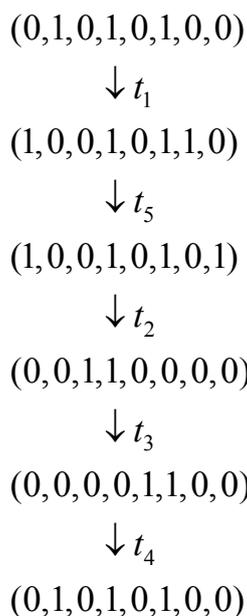


Рис. 3. Дерево достижимости модели сетей Петри для оценки времени восстановления системы

Таблица 1. Время устранения неисправности в зависимости от вида технических средств

Вид устройства	Нормативное время устранения отказа
Постовые устройства	28 мин
Рельсовые цепи	На станции 28 мин
	На перегоне 30 мин
Стрелки, стрелочные переводы	28 мин
Кабель	1 час
Светофор	25 мин

Для этого в среде моделирования CPN Tools разработана упрощенная модель поиска отказов и их устранения, приведенная на рис. 4, с использованием методологии ВСП с определенными задержками на срабатывание переходов (см. рис. 2). В качестве численных значений (временных параметров) срабатывания переходов используются статистические данные, прибытие на место, поиск и устранение неисправностей.

Переходы соответствуют следующим событиям: t_1 – отказ устройств СЦБ, t_2 – поиск неисправного элемента в системе, t_3 – замена неисправного элемента системы, t_4 – окончание устранения неисправности и проверки работы устройств, t_5 – прибытие специалистов к месту отказавшего устройства. В исходном состоянии (см. рис. 3) фишки (метки) имеются в наличии только в позициях p_2, p_4, p_6 . В соответствии со свойствами аппарата СП переход t_1 срабатывает первым с учетом задержки, равной времени, полученному по известным статистическим данным. После того как срабатывает переход t_1 , фишка переходит в позиции p_1 и p_7 .

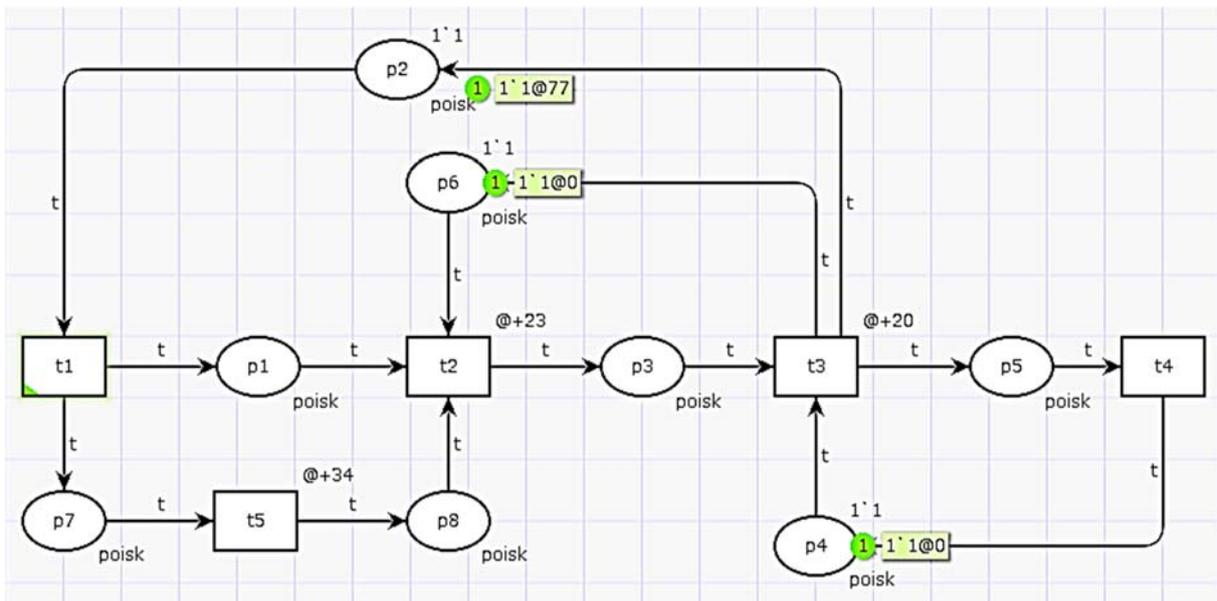


Рис. 4. Упрощенная имитационная модель общего времени восстановления T_B отказов в устройствах СЦБ (пример для устройств АБ)

Далее срабатывает переход t_5 с учетом времени прибытия на место неисправного устройства СЦБ и условия его свободности, срабатывает переход t_2 . Срабатывание перехода t_2 задерживается на время, равное времени, необходимому для поиска отказа. Условием срабатывания перехода t_3 является наличие фишек в позициях p_3 и p_4 , что означает наличие в запасе необходимых технических средств и оборудования для замены элементов устройств системы. Время задержки на срабатывание перехода t_3 зависит от времени замены отказавшего элемента устройства СЦБ. Далее фишки перемещаются в соответствии с логикой СП в позиции p_2, p_5 и p_6 . Так образуются условия для срабатывания перехода t_4 . Фишка в позиции p_5 появляется при условии выполнения задержки на срабатывание перехода t_4 , которое определяется временем окончания устранения неисправ-

ности и проверки работы устройств системы. После чего модель переходит в исходное состояние.

В конечном итоге модель оценивает общее время восстановления системы в соответствии с выражением (1). Результаты моделирования общего времени восстановления кодовой автоблокировки (АБ), электрической централизации (ЭЦ), полуавтоматической блокировки (ПАБ) и автоматической переездной сигнализации (АПС) приведены в табл. 2.

Таблица 2. Время восстановления СЖАТ

Система	T_B , мин	$t_{пр}$, мин	t_n , мин	t_y , мин
АБ	77	34	23	20
ЭЦ	81	30	28	23
ПАБ	84	32	28	24
АПС	84	32	28	24

Заключение

Для оценки общего времени восстановления СЖАТ после возникновения отказов проведен анализ нормативных документов, регламентирующих технологические операции, в том числе для предотказных состояний технических средств. Произведен анализ графика работы восстанавливаемых изделий. На базе аппарата сетей Петри выполнена формализация общего времени восстановления неисправности технических средств СЖАТ. На основе формализованного описания указанных выше процессов и возможностей среды имитационного моделирования CPN Tools разработана упрощенная имитационная модель поиска и устранения отказов в устройствах СЦБ. Предложенная модель позволяет производить оценку общего времени восстановления СЖАТ (см. табл. 2) при соблюдении технических условий и регламентов.

Необходимо отметить, что в разработанной ИМ при расчете времени поиска и устранения отказов не учитывались такие события, как хищения, отказы по вине смежных служб, время оповещения о появившейся неисправности и т. д. Данная модель позволяет моделировать технологические операции по поиску и устранению отказов и рассчитывать не только в виде определенного числа, но и в виде случайной величины, распределенной по некоторому закону.

Следующим этапом выполнения работ по исследованию ИМ поиска и устранения отказов устройств СЦБ на базе цветных временных сетей Петри является проведение исследований в реальных условиях путем натуральных наблюдений, анализа статистических данных, планирования и проведения серий имитационных экспериментов по оценке среднего времени восстановления СЖАТ.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения.
2. Сапожников Вл. В. Понятие предотказного состояния / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 12. – С. 6–8.
3. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки. Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2015 № 3168р.
4. Технический регламент о безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта. Утвержден постановлением Правительства РФ от 15 июля 2010 г. № 533.
5. Бочкарев С. В. Автоматизация алгоритма поиска отказов в стрелочном электроприводе с двухпроводной схемой управления / С. В. Бочкарев, А. А. Лыков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 4. – С. 100–107.
6. Frumin D. Branching processes of conservative nested Petri nets / D. Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation Vol. 28: EPiC Series. EasyChair, 2014. – Pp. 19–35.
7. Wang S. A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets / S. Wang, M. C. Zhou, Z. Li, and C // Wang IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2013. – Vol. 43. – No 4. – Pp. 932–940.
8. Buchina N. The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets / N. Buchina, L. Dworzanski // In Proceedings of 7th the Spring. Summer Young Researchers Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE. Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – Pp. 15–18.
9. Cabral F. G. A petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata / F. G. Cabral, M. V. Moreira, O. Diene // Transaction on Automatic Control, 2015. – Vol. 61. – No 1. – Pp. 59–71.
10. Shen Q. Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model / Q. Shen, J. Qiu, G. Liu, K. Lv // Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2016. – Vol. 18. – No 2. – Pp. 210–217.
11. Ермакова В. О. Трансляция вложенных сетей Петри для верификации разверток / В. О. Ермакова, И. А. Ломазова // Труды ИСП РАН. – 2016. – Т. 28. – No 4. – С. 115–136.
12. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 264 с.
13. Вил ван дер Ааласт. Управление потоками работ: модели и системы / Вил ван дер Ааласт, Кейс ван Хей ; пер. с англ. В. А. Башкина, И. А. Ломазовой. – М. : Физматлит, 2007. – 316 с.
14. Перникис Б. Д. Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ. – 2-е изд., перераб. и доп. / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – М. : Транспорт, 1994. – 254 с.
15. Булавский П. Е. Моделирование процессов электронного документооборота технической документации с помощью сетей Петри / П. Е. Булавский, О. К. Ваисов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т 4. – № 4. – С. 687–705.
16. Kulagin V. P. Tensor Methods of Designing Computer System Structures / V. P. Kulagin // Automatic Control and Computer Sciences. – New York, 1989. – Pp. 55–61.
17. Jensen K. Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets / K. Jensen, L. M. Kristensen // In Coloured Petri Nets. Springer: Berlin / Heidelberg, Germany, 2009. – Pp. 257–271.

18. Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М. : Маршрут, 2003. – 263 с.
19. Дмитренко И. Е. Техническая диагностика и автоконтроль систем железнодорожной автоматики и телемеханики / И. Е. Дмитренко. – М. : Транспорт, 1986. – 144 с.

Peter E. Bulavsky

Oleg K. Vaisov

«Automation and remote control on railways» department
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg

Ivan N. Bystrov

«St. Petersburg-Vitebsk distance signaling, centralization and blocking», St. Petersburg

Modeling and evaluating the time of search and elimination of failures of railway automation systems and telemechanics by means of Petri nets

The authors carried out a research to estimate the time of search and elimination of failures, taking into account the formalization of technological processes of search and elimination of failures of technical means of railway automation and telemechanics systems with the help of Petri nets apparatus. A simplified simulation model was developed for estimating the time for the elimination of a failure in the RARCS by analyzing the state of technical means, statistical and regulatory documentation. The methods of the theory of Petri nets were used, which is based on the discrete-event paradigm of SM. As well as the method of calculating the time to troubleshoot technical problems in the RARCS. The analysis of the regulatory documentation governing the technological operations for the search and elimination of failures, including the pre-failure states of the RARCS technical equipment, was carried out. The analysis of the work schedule recoverable products was carried out too. The formalization of technological processes for the search and elimination of failures in RARCS based on the methodology of Petri nets was done. A simplified simulation model of Petri nets was developed for estimating the time of failure search and their elimination. The analysis of the technical states of RARCS based on the developed simplified model of Petri nets for estimating the time of failure search and their elimination allows us to estimate the average time of their recovery after a malfunction.

failure, pre-failure condition, colored temporary Petri nets, marking, positions, transitions, arcs, events, conditions.

References

1. GOST 27.002–2015. Nadezhnost' v tekhnike (SSNT). Terminy i opredeleniya. [GOST 27.002–2015 Reliability in engineering (CCNT). Terms and Definitions.].
2. Sapozhnikov Vl. V., Lykov A. A., Efanov D. V. (2011). Ponyatiye predotkaznogo sostoyaiya [The concept of pre-failure condition]. Avtomatika svyaz', informatika [Communication Automation, Computer Science]. – Issue 12. – Pp. 6–8.

3. Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustroystv i sistem signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki. Utverzhdena rasporyazheniyem OAO «RZHD» ot 30.12.2015 № 3168r. [Instructions for maintenance and repair of devices and alarm systems, centralization and blocking. Approved by the order of JSC “Russian Railways” dated December 30, 2015 No 3168r].
4. Tekhnicheskiiy reglament o bezopasnosti vysokoskorostnogo zheleznodorozhnogo transporta (utv. postanovleniyem Pravitel'stva RF ot 15 iyulya 2010 g. № 533) [Technical regulations on the safety of high-speed rail transport (approved by the Government of the Russian Federation dated July 15, 2010 No 533)].
5. Bochkarev S. V., Lykov A. A. (2013). Avtomatizatsiya algoritma poiska otkazov v strelochnom elektroprivode s dvukhprovodnoy skhemoy upravleniya [Automation of the search algorithm for failures in a switch actuator with a two-wire control circuit]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of St. Petersburg University of Communications]. Saint Petersburg, PGUPS. – Issue 4. – Pp. 100–107.
6. Frumin D., Lomazova I. A. Branching processes of conservative nested Petri nets. VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation Vol. 28: EPiC Series. EasyChair, 2014. – Pp. 19–35.
7. S. Wang, M. C. Zhou, Z. Li, and C. Wang, "A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, vol. 43, no 4. – July 2013. – Pp. 932–940.
8. Buchina Nina and Dworzanski Leonid. The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. In Proceedings of 7th the Spring / Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE '13. Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – Pp. 15–18.
9. Cabral F. G., Moreira M. V. and Diene O. (2015), “A Petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata,” Transaction on Automatic Control, vol. 61, No 1. – Pp. 59–71.
10. Shen Q., Qiu J., Liu G. and Lv K. “Intermittent fault’s parameter framework and stochastic Petri net based formalization model,” Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, vol. 18, No 2. – 2016. – Pp. 210–217.
11. Yermakova V. O., Lomazova I. A. (2016). Translyatsiya vlozhennykh setey Petri dlya verifikatsii razvertok [Translation of nested Petri nets for verification of sweeps] Proceedings of ISP RAS. vol. 28, No 4. – Pp. 115–136.
12. Piterson Dzh. Teoriya setey Petri i modelirovaniye system. [Theory of Petri nets and system modeling]. Moscow, Mir. Publ. 1984. – 264 p.
13. Wil van der Aalas. V. A. Bashkin, Lomazova I. A. Upravleniye potokami rabot: modeli i sistemy [Workflow management: models and systems] trans. with English. – Moscow : Fizmatlit. Publ. 2007. – 316 p.
14. Pernikis B. D., Yagudin R. Sh. (1994). Preduprezhdeniye i ustraneniye neispravnostey v ustroystvakh SCB [Warning and troubleshooting in signaling devices]. Moscow, Transport. Publ. – 254 p.
15. Bulavsky P. E., Vaisov O. K. (2018). Simulation of electronic documentation flow of technical documentation using Petri nets [Modelirovaniye protsessov elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii s pomoshch'yu setey Petri]. Avtomatika na Transporte [Avtomatika na transporte], vol. 4, issue 4. – Pp. 687–705.

16. Kulagin V. P. Tensor Methods of Designing Computer System Structures / V. P. Kulagin // Automatic Control and Computer Sciences. – New York, 1989. – Pp. 55–61.
17. Jensen K., Kristensen L. M. Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets. In Coloured Petri Nets; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009. – Pp. 257–271.
18. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov Vl. V., Shamanov V. I. (2003). Reliability of railway automation systems and remote control and communication [Nadezhnost' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki i svyazi]. Moscow, Marshrut. – 263 p.
19. Dmitrenko I. E. (1986). Tekhnicheskaya diagnostika i avtokontrol' sistem zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Technical diagnostics and auto-control of railway automation and telemechanics systems]. Moscow : Transport. – 144 p.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии М. Н. Василенко.
Поступила в редакцию 27.03.2019, принята к публикации 17.05.2019.*

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: pbulavsky@gmail.com

ВАЙСОВ Олег Кахрамонович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.
e-mail: olegvaisov@gmail.com

БЫСТРОВ Иван Николаевич – электромеханик, Санкт-Петербург-Витебская дистанция сигнализации, централизации и блокировки, ЕДЦУ ШЧ-9 пост ДЦ.
e-mail: youngg.x5@gmail.com

© Булавский П. Е., Вайсов О. К., Быстров И. Н., 2019