

УДК 656.25:004.942

**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*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ В СИСТЕМАХ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА БАЗЕ ИЕРАРХИЧЕСКИХ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Проведен анализ статистических данных об отказах систем интервального регулирования движения поездов. Выполнены исследования по оценке времени поиска и устранения отказов с учетом требований формализации технологических процессов поиска и устранения отказов сигнальной точки системы числовой кодовой автоблокировки с помощью аппарата иерархических цветных временных сетей Петри. Разработана имитационная модель для оценки времени восстановления системы по результатам поиска отказов сигнальной точки путем анализа состояния технических средств, статистической и нормативной документации. Используются методы теории сетей Петри, которые базируются на дискретно-событийной парадигме имитационного моделирования, а также информационный метод поиска и устранения неисправностей технических средств в системах железнодорожной автоматики и телемеханики. Разработанная имитационная модель позволяет оценить среднее время восстановления системы после возникновения неисправности в сигнальной точке числовой кодовой автоблокировки. Модель позволяет осуществлять настройки временных параметров технологического процесса поиска отказов (время оповещения, время прибытия к месту, время поиска отказов и время устранения неисправности). Для корректной оценки вышеуказанных параметров с учетом местных особенностей дистанции СЦБ и квалификации обслуживающего персонала в имитационной модели существует возможность задания как детерминированного, так и вероятностного срабатывания переходов сетей Петри.

Автоблокировка, отказ, неисправность, иерархические цветные временные сети Петри, метки, позиции, переходы, ингибиторные дуги, события, условия

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-356-376

Введение

Одно из важнейших средств управления движением поездов на перегонах — автоматическая блокировка (АБ). По мере увеличения интенсивности движения требования к надежности работы автоматической блокировки постоянно возрастают. В некоторых случаях неисправность устройств интервального регулирования приводит к снижению не только пропускной способности железнодорожных участков, но и безопасности движения поездов [1].

В соответствии с [2] на сети отечественных железных дорог в эксплуатации находится 41 502 рельсовые цепи (58,7% от общего числа рельсовых цепей), включенные в систему числовой кодовой автоблокировки (ЧКАБ). Удельный

показатель количества отказов на 100 рельсовых цепей составляет 14,68. В целом 80 % (зона Парето) отказов приходится на аппаратуру сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), монтаж и рельсовые линии (см. рис. 1).

Анализ (см. рис. 2) показывает, что большая часть отказов в автоблокировке с децентрализованным размещением аппаратуры приходится на ЧКАБ – 2838 случаев (86 %), а в элементах 1283 случаев (39 %) – отказы аппаратуры СЦБ, 739 случаев (23 %) – монтаж устройств СЦБ (см. рис. 3).

По остальным элементам наблюдаются следующие отказы (см. рис. 3): рельсовая линия – 306 случаев (9 %), кабель – 272 (8 %), аппаратура защиты – 210 (6 %), светофоры – 131 (4 %), устройства электропитания – 83 (3 %) и т. д. Из диаграммы (рис. 3) видно, что более всего подвержена отказам аппаратура СЦБ (39 %) и монтаж устройств (23 %).

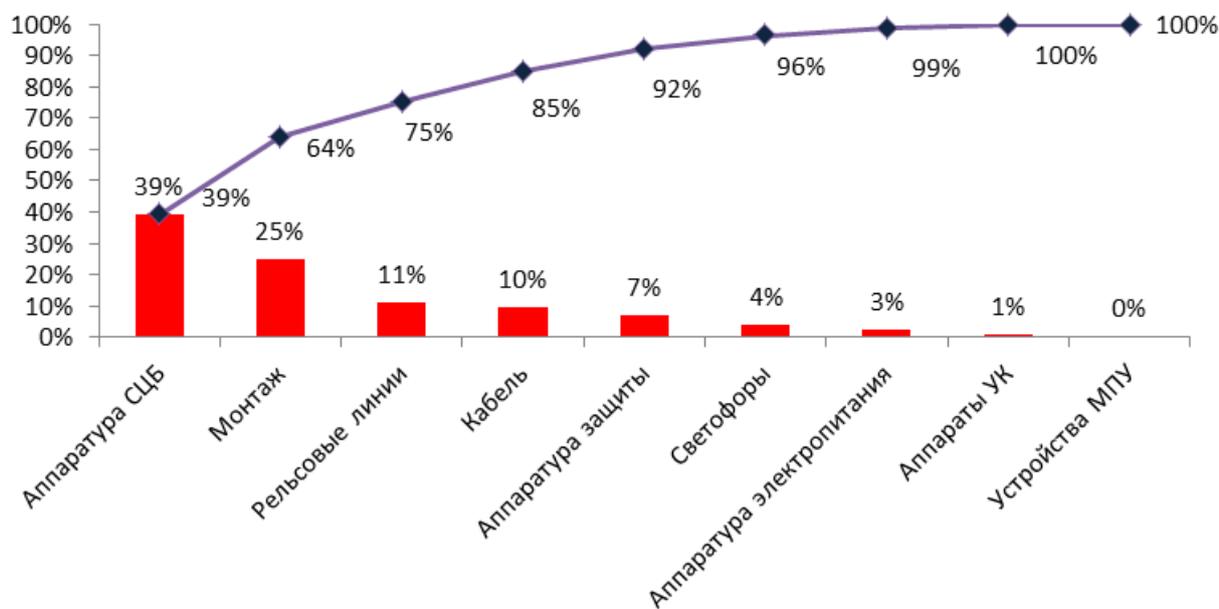


Рис. 1. Диаграмма распределения отказов автоблокировки в хозяйстве Ш по элементам

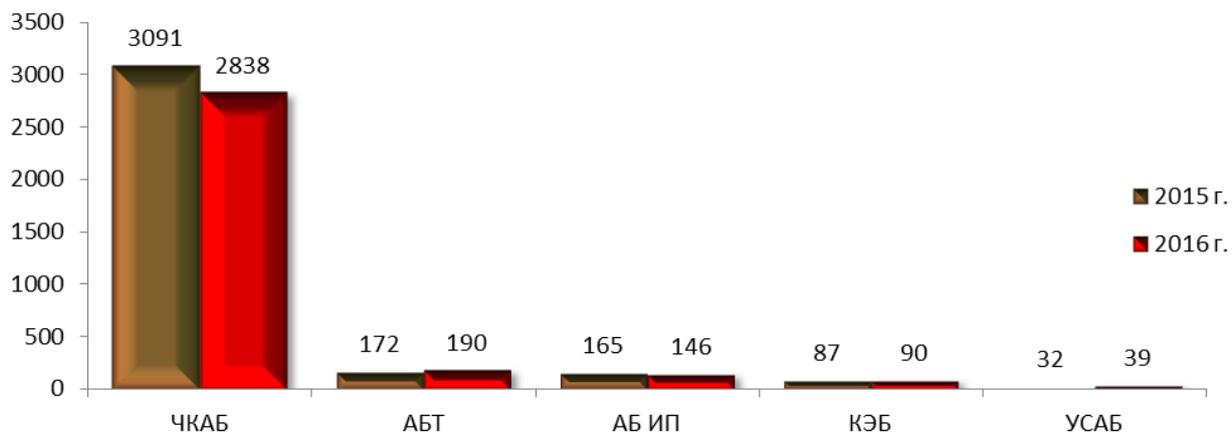


Рис. 2. Распределение отказов систем АБ с децентрализованным размещением аппаратуры по хозяйству Ш



Рис. 3. Диаграмма распределения отказов систем АБ с децентрализованным размещением аппаратуры по хозяйству Ш по элементам

В соответствии с методами сокращения времени на поиск причины отказа после возникновения неисправностей сформулированы требования к методам и моделям оценки времени восстановления устройств систем железнодорожной автоматики и телемеханики для моделирования их при помощи аппарата СП.

1. Формализация технологического процесса поиска неисправностей технических средств с учетом их территориального распределения.

2. Вложенность, т. е. возможность замещать одним переходом СП несколько сетей, характеризующих технологические операции процесса поиска отказов в связи с громоздкостью алгоритма поиска неисправностей.

3. Возможность задания детерминированного или вероятностного характера времени выполнения технологических операций по поиску неисправностей СЖАТ (возникновения, поиска, устранения неисправностей и восстановления системы) и влияния квалификации обслуживающего персонала.

4. Возможность анализировать параллельные технологические процессы поиска неисправностей и их визуальная оценка.

5. Возможность наглядного представления процессов поиска отказа.

6. Наличие инструментальных средств диагностирования и отладки имитационных моделей на базе методологии СП.

7. Относительная простота алгоритмизации и программной реализации технологических процессов поиска неисправностей СЖАТ.

8. Возможность настройки ИМ на определенные виды неисправностей устройств СЖАТ.

В статье рассматривается построение имитационных моделей (ИМ) оценки времени восстановления при поиске отказов релейных систем интервального регулирования движения поездов с использованием аппарата иерархических

цветных временных сетей Петри и возможностей среды моделирования *CPN Tools*.

1. Актуальность оценки времени восстановления системы после отказа

Существует целый ряд мероприятий по повышению надежности систем железнодорожной автоматики и телемеханики: планово-профилактические работы, организация новых методов обслуживания, обучения обслуживающего персонала правилам и методам устранения отказов. Практика эксплуатации показывает, что время поиска и устранения отказов остается относительно большим. Кроме того, расходы на устранение отказов устройств СЦБ прямо пропорциональны времени восстановления. Экономические потери от задержек поездов при возникновении неисправностей устройств СЦБ, в особенности, на грузонапряженных участках железных дорог, увеличиваются значительно быстрее, чем время восстановления системы [3].

Согласно [4], 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 системы диспетчерской централизации (ДЦ), диспетчерского контроля (ДК), системы передачи данных линейного пункта (СПЛ-ЛП), автоматизированной системы для централизованного контроля технического состояния подвижного состава (АСК-ПС), дежурного по станции (ДСП), поездного диспетчера (ДНЦ), машиниста поезда, дежурного по переезду, работников хозяйств автоматики и телемеханики, пути, электроснабжения и т. д. определяется как:

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

где t_i – время, необходимое для:

- 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 неисправности 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 нарушений;
- устранения неисправности технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры (определяется по каждому виду устройств);
- проверки действия устройств инфраструктуры после устранения неисправности технических средств;
- передачи и оформления сообщения об устранении неисправности технических средств, приведших к нарушению нормальной работы устройств инфраструктуры.

В соответствии с [5], среднее время собственно восстановления неисправности технических средств является наиболее обобщающим критерием ремонтно-пригодности устройств. Оно складывается из времени оповещения причастных работников об отказах t_o , времени следования к объекту отказа $t_{пр}$, времени поиска места отказа t_n , времени устранения t_y . Таким образом:

$$T_v = t_o + t_{пр} + t_n + t_y. \quad (2)$$

Эксплуатация систем АБ демонстрирует (см. рис. 2), что в наибольшей степени подвержена отказам система интервального регулирования – ЧКАБ. На рисунке 4 показана диаграмма со статистическими данными распределения отказов устройств числовой кодовой автоблокировки. Из диаграммы видно, что основными причинами отказов блоков являются полупроводниковые приборы (38%), конденсаторы (14%) и другие составляющие. Реле: вспомогательное, повторитель трансмиттерного, реле – счетчик импульсов и интервалов.

Время восстановления системы после возникновения отказа – важный показатель. Практика эксплуатации вышеуказанных систем демонстрирует, что восстановление системы часто зависит от времени, затрачиваемого непосред-

Причины отказов блоков дешифратора (ДА)

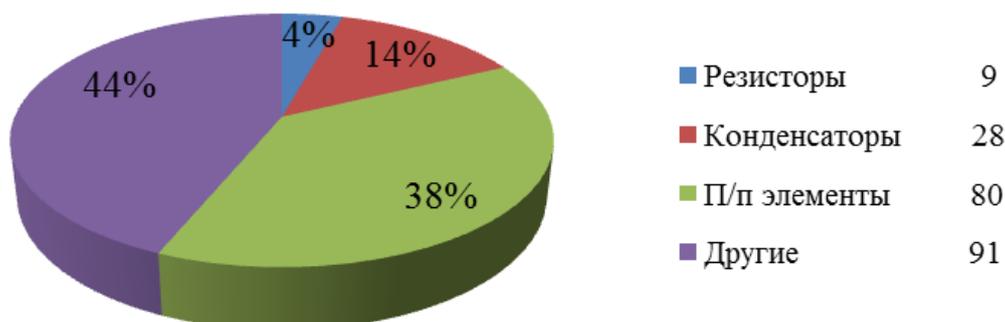


Рис. 4. Диаграмма распределения причин отказов элементов системы ЧКАБ

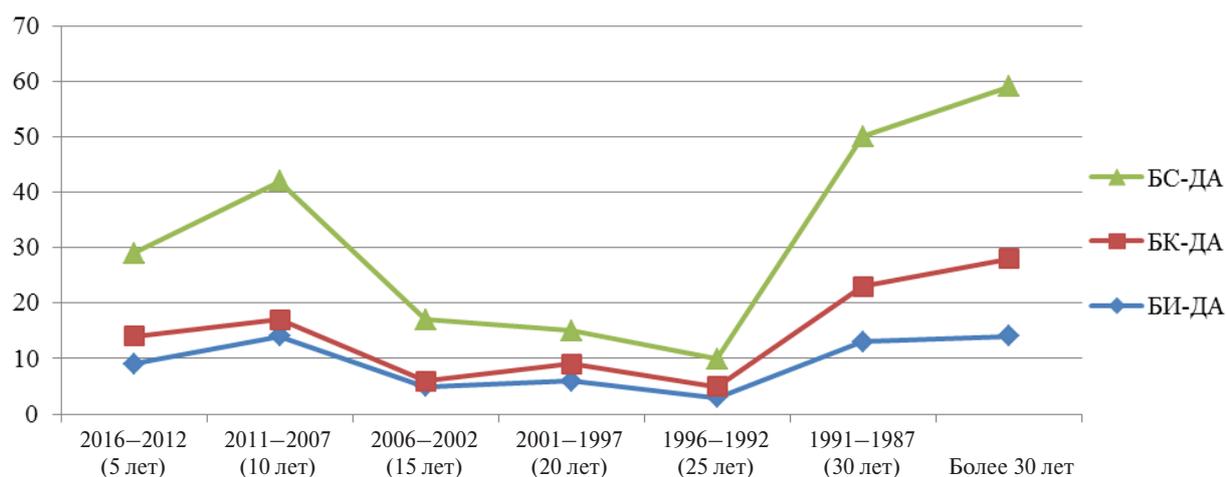


Рис. 5. График распределения отказов блоков дешифратора ЧКАБ в зависимости от продолжительности эксплуатации

ственно на поиск и локализацию отказа, а не на его устранение, поэтому оценка временных параметров технологических процессов, реализуемых при восстановлении системы СЖАТ, становится актуальной задачей. Наиболее эффективный метод решения поставленной задачи – имитационное моделирование. Разработка ИМ позволяет оценивать время восстановления системы по заранее определенным алгоритмам, что исключает влияние предыдущего опыта поиска неисправностей и прочих внешних факторов.

Из рисунка 5 следует, что распределение отказов блоков дешифратора ЧКАБ в зависимости от продолжительности эксплуатации растет, а самым уязвимым блоком ДА будет блок БС-ДА. Данная система эксплуатируется на участках железных дорог России более 30 лет, поэтому количество отказов будет расти, что приведет к увеличению задержек поездов и экономических потерь.

2. Формализация процесса поиска отказов с помощью иерархических цветных сетей Петри

Сети Петри применяются как математический аппарат для формализации, анализа и моделирования дискретно-событийных систем [6–7]. Из-за слабосвязанной многоуровневой структуры сети можно использовать для эффективного моделирования различных технологических процессов [8–9].

Один из перспективных методов формализации описания и анализа сложных технологических процессов поиска неисправностей в технических системах – методология сетей Петри, которые являются распространенным графическим средством исследования систем. Популярность их вызвана удобным представлением различных типов объектов, присутствующих во многих моделируемых системах, и событийным подходом к моделированию. Сети Петри обладают

наилучшими возможностями для описания взаимосвязей и взаимодействий параллельно работающих процессов [10–12].

Формализацию поиска отказов целесообразно производить на базе иерархических цветных сетей Петри в связи с громоздкостью самого алгоритма поиска отказов сигнальной точки числовой кодовой автоблокировки. Согласно [13], иерархические цветные сети Петри задаются следующим набором:

$$HCPN = (S, SN, SA, PN, PT, PA, FS, FT, PP), \quad (3)$$

где S – конечный набор страниц ($s \in S$), представляющий собой неиерархическую цветную сеть Петри: $CPN = (P, T, A, \Sigma, N, C, G, E, I)$; $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – конечное множество позиций, т. е. условий, при которых выполняется технологическая операция поиска неисправностей; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – конечное множество переходов; $P \cup T = \emptyset$ и $P \cap T = \emptyset$; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_l\}$ – конечное множество направленных дуг; Σ – конечное множество непустых наборов цветов; N – функция узла, определенная из A в P , $P \times T \cup T \times P$; $C: P \rightarrow \Sigma$ – функция набора цветов, которая назначает цвет для каждого места; $G: T \rightarrow EXPR$ – защитная функция, которая назначает защиту для каждого перехода t следующим образом:

$$[Type(G(t)) = Bool \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma];$$

$E: A \rightarrow EXPR$ – функция выражения дуги, которая присваивает дуговое выражение каждой дуге a :

$$\forall a \in A: [Type(E(a)) = C(p(a))_{MS} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma];$$

$I: P \rightarrow EXPR$ – функция инициализации, которая присваивает выражение инициализации каждому месту p :

$$\forall p \in P: [Type(I(p)) = C(p)_{MS} \wedge Type(Var(I(p))) \subseteq \emptyset];$$

тип (v) обозначает тип переменной v , $Var(expr)$ – набор переменных в выражении $expr$;

наборы элементов сети попарно не пересекаются:

$$\forall s_1, s_2 \in S: [s_1 \neq s_2 \Rightarrow (P_1 \cup T_1 \cup A_1) \cap (P_2 \cup T_2 \cup A_2) = \emptyset];$$

$SN \subseteq T$ – набор узлов замещения; SA – функция назначения страницы; $PN \subseteq P$ – определение набора узлов порта; PT – функция типа порта, определяется из PN в $(in, out, i/o, general)$; PA – функция назначения порта; $FS \subseteq P$ – конечный набор множеств слияния; FT – тип слияния функций; $PP \in SM$ – множество простых страниц.

3. Моделирование поиска неисправностей устройств железнодорожной автоматики на иерархических цветных временных сетях Петри

Сформулируем задачу моделирования как оценку времени восстановления системы при возникновении неисправности в целом и выполнении технологических операций по поиску отказавшего элемента. Присутствие фишек на определенных позициях будет означать существование соответствующего задания или запроса на выполнение проверок, необходимых для устранения неисправностей устройств СЦБ.

Имитационная модель, построенная посредством аппарата иерархических цветных временных сетей Петри (ИВЦСП), позволяет провести анализ последовательности проверок элементов системы. 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.

В [14] представлена информационная диаграмма поиска отказов, которая определяет общий порядок действий при ложном горении красного огня ЧКАБ. В соответствии с [15] преобразуем информационную диаграмму в сеть Петри для построения имитационной модели на базе иерархических цветных СП с временными ограничениями (рис. 6). Атрибуты позиции в соответствии с [16–17] и синтаксисом языка *CPN ML* представлены в виде выражения $I1$, которое задает начальную маркировку позиций, состоящую из одной фишки (метки) со значением 1.

Разработанная имитационная модель построена на основе метода информационных диаграмм [18] с использованием особенностей ИЦВСП и программного комплекса *CPN Tools* [19].

С учетом особенностей поиска отказов в устройствах СЦБ фишки имеют временной характер и для задания их свойств использовано следующее обозначение:

$$\textit{closet chkab} = \textit{int timed},$$

где *closet* – системное слово языка *CPN ML* для определения типа данных; *timed* – системное слово языка *CPN ML*, означающее, что фишки данного типа имеют временные метки; *chkab* – обозначение нового типа данных; *int* – название типа данных (*integer*).

Атрибутом дуг ИЦВСП служит переменная *t*, необходимая для переноса соответствующих фишек между позициями и переходами. Переменная *t* объявлена следующим образом: *var t : chkab*. Возможности среды моделирования *CPN Tools* позволяют задавать временные задержки срабатывания переходов и перемещения фишек через дуги путем задания случайной величины, распределенной по некоторому закону [20]. В качестве примера рассмотрим задание задержек

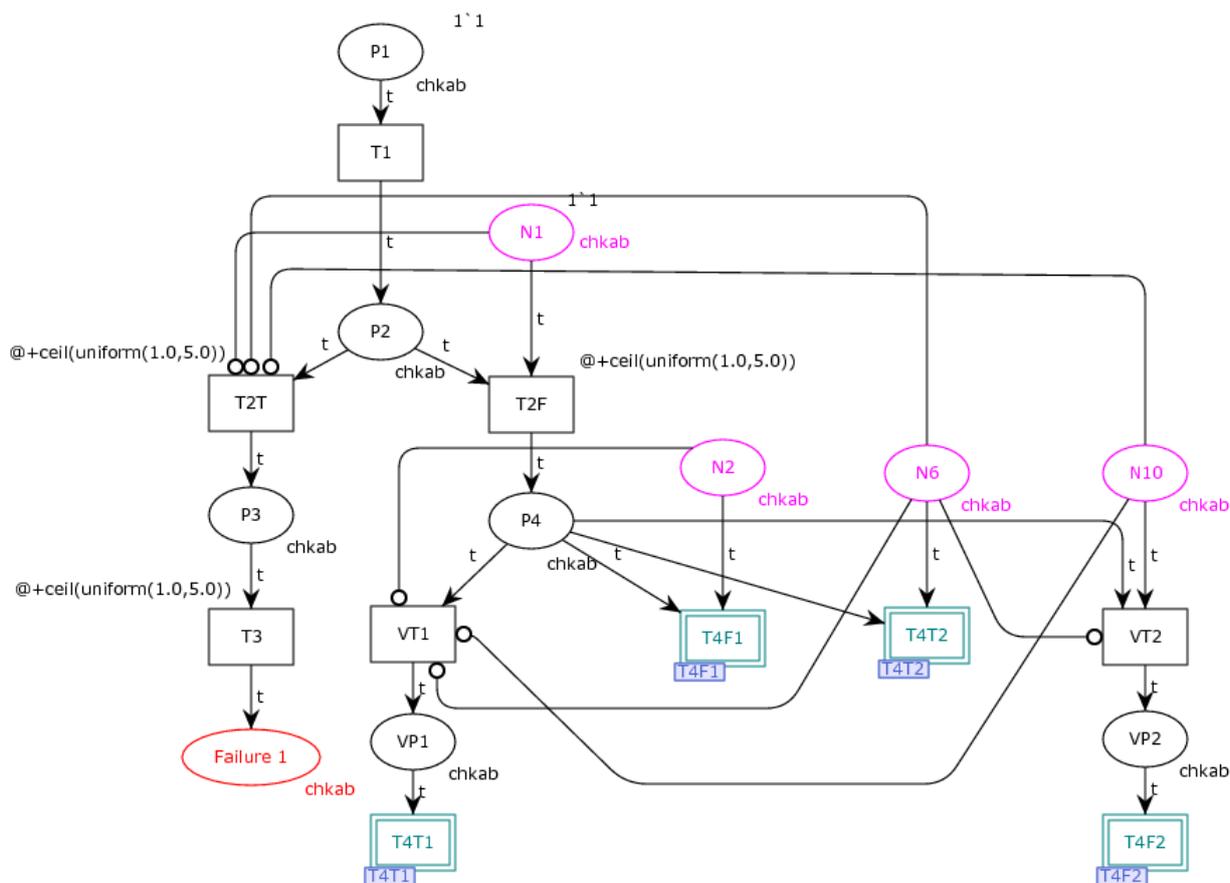


Рис. 6. Имитационная модель оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

по срабатыванию для переходов $T2T$, $T2F$, $T3$, в которых используется функция равномерного (*uniform*) закона распределения случайных величин. Параметры выбраны путем экспертной оценки времени, необходимого для осуществления соответствующих операций при поиске отказов:

$$1'1@+ceil(uniform(1.0,5.0)).$$

В имитационной модели 24 основных и 25 вспомогательных позиций, необходимых для настройки исследования определенных неисправностей, плюс 23 основных и 2 вспомогательных перехода (см. табл. 1 и табл. 2).

Таким образом, характерным проявлением повреждений сигнальной точки ЧКАБ является горение красного огня на проходном сигнале при свободном блок-участке. Причиной такого повреждения может быть отказ аппаратуры питающего или релейного конца, отказ в рельсовой цепи. Поиск отказа, как правило, следует начинать с релейного конца по месту нахождения сигнала с ложным запрещающим показанием. На основе информационной диаграммы поиска отказов и с учетом особенностей ИМ составлена таблица основных видов

Таблица 1. Значение множества переходов

Обозначение переходов	Описание переходов
T1	Горение красного огня при свободном блок-участке удаления
T2F	Реле Ж временно встает под ток или без тока
T2T	Реле Ж под током
T3	Обрыв цепи повторителя реле Ж
T4T1	Реле И находится под током (отсутствует импульсная работа)
T4F1	Реле И без тока
T4T2	Реле И работает нормально, характеристика кода соответствует требованиям
T4F2	Реле И работает нормально, характеристика кода не соответствует требованиям (искаженный код)
T5	Подпитка РЦ посторонним источником переменного тока или отказ в аппаратуре питающего конца (Т, КППТ)
T6T	Импульсное напряжение на путевом реле в норме
T6F	Импульсное напряжение на путевом реле отсутствует или ниже нормы
T7	Неисправно путевое реле или нарушен контакт в штепсельной розетке
T8F	Неисправен фильтр ЗБФ
T8T	Исправен фильтр ЗБФ
T9	Заменить фильтр ЗБФ
T10T	Монтаж от ЗБФ до путевого реле исправен
T10F	Неисправность в монтаже от ЗБФ до путевого реле
T11	Заменить реле и отправить его на проверку в РТУ
T12	Устранить неисправность в монтаже от ЗБФ до путевого реле
T13T	Напряжение на входе 1–81 блока БС-ДА (СХ–МСХ) менее 15 вольт
T13F	Напряжение на входе 1–81 блока БС-ДА (СХ–МСХ) – 15–17 вольт
T14T	Напряжение на ПХ-ОХ 220 ниже 198 вольт
T14F	Напряжение на ПХ-ОХ 220 – 198–242 вольт
T15	Выяснение причины низкого напряжения на ПХ-ОХ 220
T16	Неисправен трансформатор СОБС или повреждение в монтаже шкафа
T17F	Напряжение П-М на выходе блока БС-ДА ниже 12 вольт
T17T	Напряжение П-М на выходе блока БС-ДА ниже 13–15 вольт
T18	Отказ выпрямителя
T19	Заменить блок БС-ДА
T20	Потеря емкости конденсаторов
T21	Заменить блок БК-ДА
T22	Замыкание изолирующих стыков у сигнальной установки
T23	Неисправность на питающем конце, необходимо проверить тип и исправность КППШ

Таблица 2. Значение множества позиций

Обозначение позиции	Описание позиции
P1	Периодическое или постоянное горение красного огня при свободном блок-участке удаления
P2	Проверка состояния реле Ж
P3	Проверка цепи повторителя (Ж1) реле Ж
P4	Проверка характера работы реле И
P5	Реле И находится под током непрерывно
P6	Измерение напряжения на путевом реле
P7	Импульсное напряжение на путевом реле не менее 5 вольт
P8	Проверка исправности фильтра ЗБФ сравнением напряжения на его входе (8–15 В) и выходе (6–7 В)
P9	Несоответствие входных и выходных параметров фильтра ЗБФ
P10	Проверка монтажа от ЗБФ до путевого реле И
P11	Неисправности реле И
P12	Неисправен монтаж от ЗБФ до реле И
P13	Проверка напряжения на входе 1–81 блока БС-ДА (СХ–МСХ)
P14	Проверка напряжения на ПХ 220
P15	Менее 198 вольт на ПХ 220
P16	Напряжение 198–242 на ПХ 220
P17	Проверить напряжение П-М на выходе блоков
P18	Ниже 12 вольт на выходах П-М блоков
P19	Выпрямитель в блоке БС-ДА неисправен
P20	Напряжение на П-М выходе блоков БС-ДА и БК-ДА не соответствует требованиям
P21	Емкость конденсаторов не соответствует требованиям
P22	Проверить качество импульсного напряжения на путевом реле с учетом отключения кабельных жил питающего конца смежной РЦ
P23	Восстановления работы реле Ж
P24	Изменение длительности импульсов

неисправностей, которые могли привести к ложному показанию в сигнальной точке ЧКАБ.

На модели неисправности обозначены через позиции соответственно *Failure 1*, *Failure 2*, ..., *Failure 12*. В соответствии с этой таблицей ИМ (см. рис. 5) настраивается на один из 12 видов неисправностей путем установки «1» (наличия) или «0» (отсутствия) фишки на позициях, обозначенных как N1, N2, ..., N11.

В разработанной имитационной модели поиск отказов сигнальной точки осуществляется путем последовательного прохождения фишки (метки) через

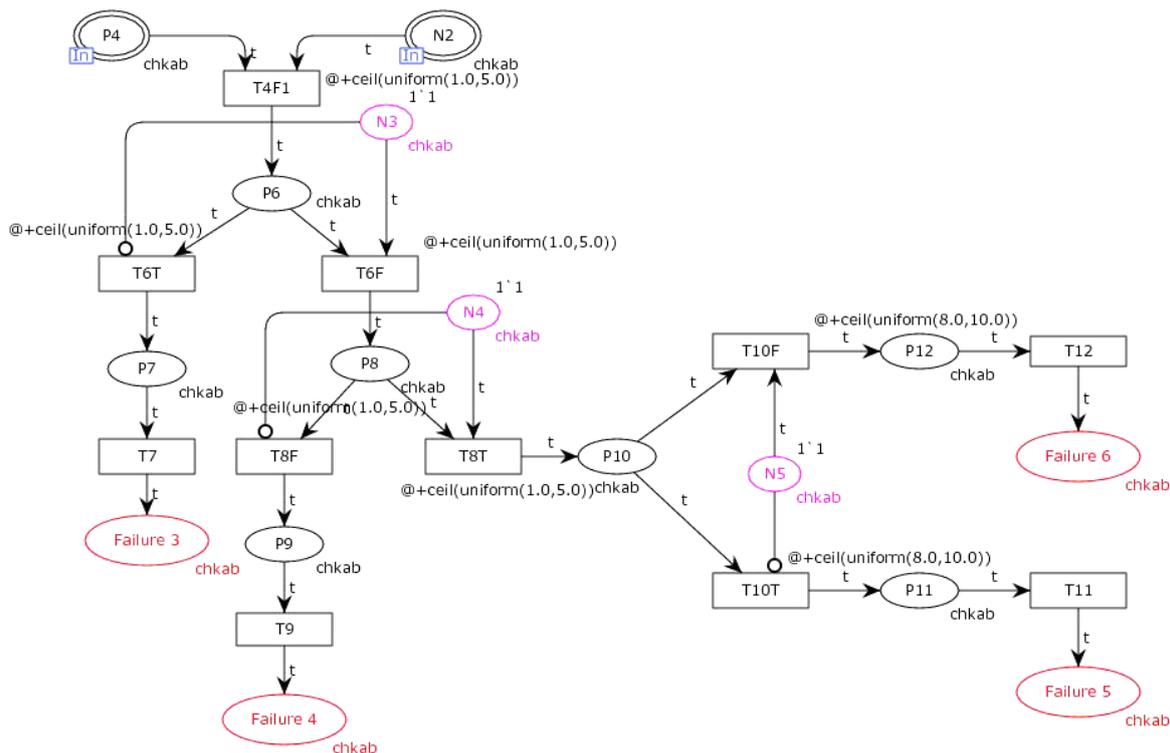


Рис. 7. Вложенная модель T4F1 оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

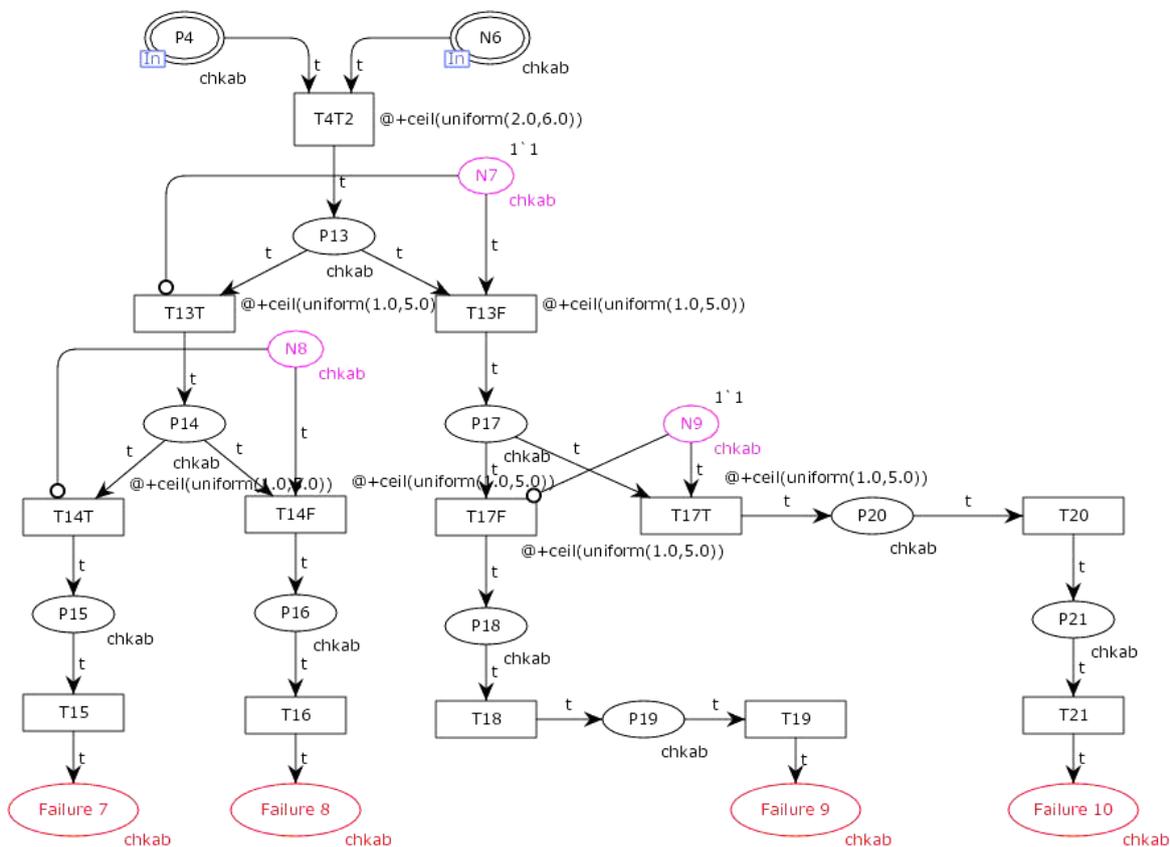


Рис. 8. Вложенная модель T4T2 оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

Таблица 3. Задания для имитационной модели сигнальной точки ЧКАБ

Неисправности сигнальной точки ЧКАБ	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
1. Обрыв повторителя реле Ж	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2. Подпитка РЦ посторонним ИП переменного тока или от- каз Т, КПТ	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3. Неисправно реле И или на- рушен контакт в штепсельной розетке	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4. Заменить ЗБФ	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5. Заменить реле И	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
6. Устранить неисправность монтажа ЗБФ	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
7. Выяснить причину пониже- ния напряжения ПХ 220	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
8. Неисправность трансфор- матора СОБС или поврежде- ние в монтаже	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
9. Отказ выпрямителя, заме- нить БС-ДА	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
10. Потеря емкости конденса- торов, заменить блок БК-ДА	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
11. Замыкание ИС у сигналь- ной точки	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
12. Неисправность на ПК, проверить исправность и тип КПТШ	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

позиции, дуги и переходы в соответствии с логикой аппарата СП. Для исключения ложных срабатываний переходов организована логическая связь через ингибиторные дуги. Функции программного комплекса CPN Tools позволяет осуществлять моделирование как в пошаговом, так и в автоматическом режиме. Одна единица модельного времени приравнивается к одной минуте реального времени. В соответствии с [21] значением времени оповещения и прибытия ($t_o + t_{np}$) на место непосредственного поиска причин принято среднее статическое время 31 минута. Соответственно, для устранения обнаруженного отказа 23 минуты значения $t_{н}$ имитационная модель автоматически формирует исходя из временных параметров, заложенных в значениях срабатывания переходов (см. табл. 4).

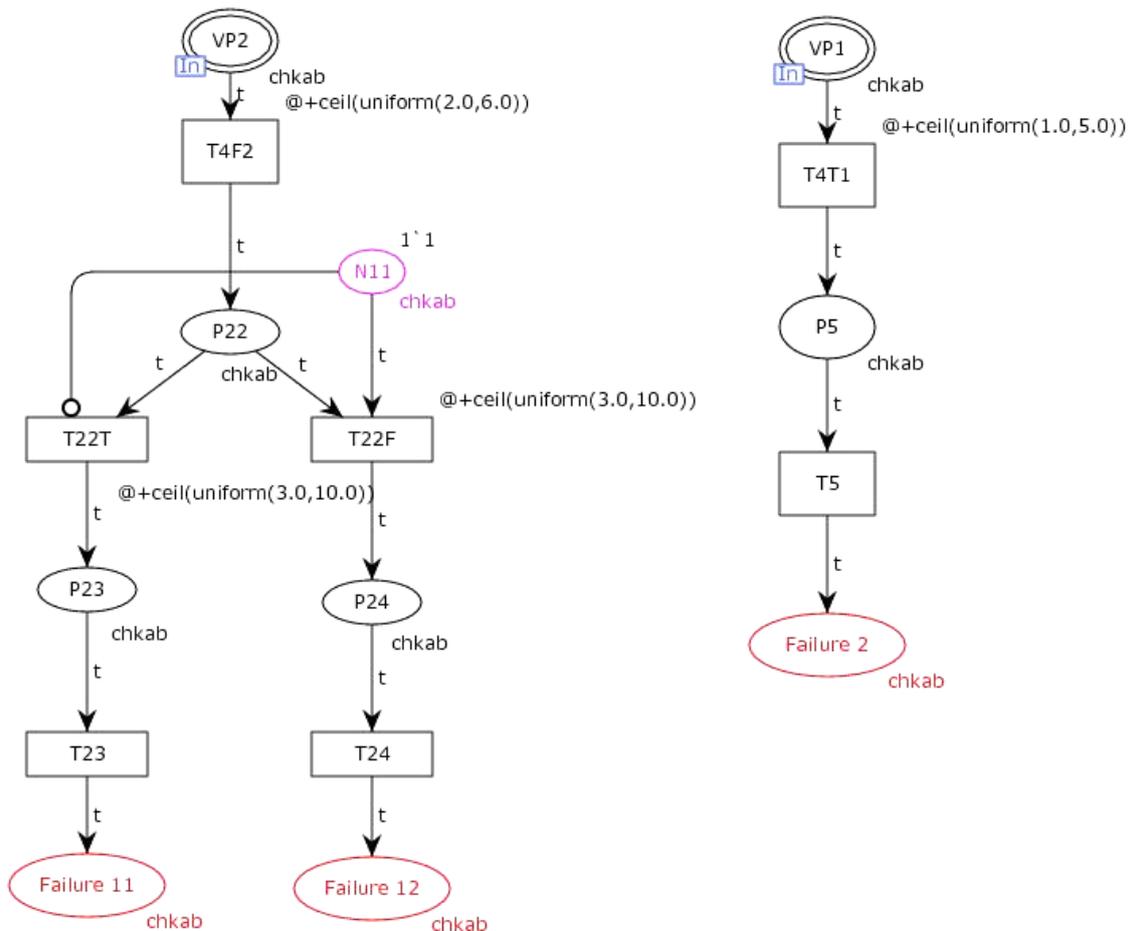


Рис. 9. Вложенная модель T4F2 и T4T2 оценки времени поиска отказов сигнальной точки ЧКАБ на базе ИЦВСП

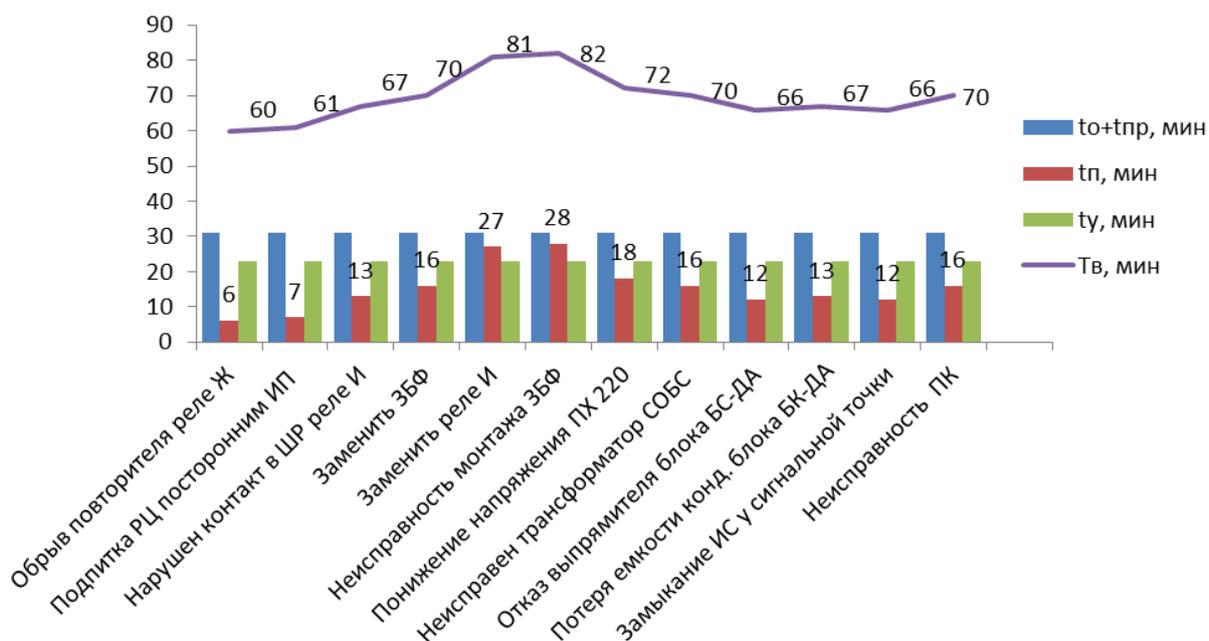


Рис. 10. Распределение времени восстановления системы по устройствам ЧКАБ при отказе сигнальной точки

Таблица 4. Временные параметры восстановления системы ЧКАБ

Неисправности сигнальной точки ЧКАБ	$t_o + t_{np}$, мин	t_n , мин	t_y , мин	T_v , мин
1. Обрыв повторителя реле Ж	31	6	23	60
2. Подпитка РЦ посторонним ИП переменного тока или отказ Т, КПТ	31	7	23	61
3. Неисправно реле И или нарушен контакт в штепсельной розетке	31	13	23	67
4. Заменить ЗБФ	31	16	23	70
5. Заменить реле И	31	26	23	80
6. Устранить неисправность монтажа ЗБФ	31	28	23	82
7. Выяснить причину понижения напряжения ПХ 220	31	18	23	72
8. Неисправность трансформатора СОБС или повреждение в монтаже	31	16	23	70
9. Отказ выпрямителя, заменить БС-ДА	31	12	23	66
10. Потеря емкости конденсаторов, заменить блок БК-ДА	31	17	23	67
11. Замыкание ИС у сигнальной точки	31	12	23	66
12. Неисправность на ПК, проверить исправность и тип КПТШ	31	16	23	70

Имитационная модель позволяет оценить время восстановления системы ЧКАБ при вышеуказанных неисправностях сигнальной точки (табл. 4) и показывает самые уязвимые для АБ отказы, которые приводят к наиболее длительному времени восстановления системы. Результаты исследования также представлены в виде графика на рисунке 10.

Заключение

В статье проведен анализ систем интервального регулирования движения поездов на перегоне с децентрализованным размещением аппаратуры. Статистические данные показывают, что система ЧКАБ – самая распространенная в соответствующей группе; она эксплуатируется на сети железных дорог России более 30 лет, вследствие чего особенно подвержена отказам по вышеупомянутым причинам. Для решения задачи формализации определения времени восстановления в целом и времени поиска отказов в частности и построения имитационной модели на базе ИЦВСП выбрана система ЧКАБ. Разработаны требования

к имитационным моделям поиска неисправностей устройств СЖАТ. Проведен анализ нормативной документации, регламентирующей технологические операции по поиску отказов. На основе формализованного описания процессов восстановления системы и возможностей среды имитационного моделирования *CPN Tools* разработана имитационная модель поиска и устранения отказов для восстановления системы ЧКАБ при неисправностях сигнальной установки.

Предложенная модель позволяет производить оценку среднего времени восстановления системы (см. табл. 4) с учетом соблюдения технических условий и регламентов, местных условий и особенностей расположения сигнальных точек применительно к каждой дистанции СЦБ.

Необходимо отметить, что в разработанной имитационной модели при расчете времени поиска и устранения отказов не учитывались такие события, как хищения, отказы по вине смежных служб и т. д.

Следующими этапами выполнения работ по исследованию имитационной модели поиска и устранения отказов в системах интервального регулирования движения поездов на базе ИЦВСП стали исследования в реальных условиях путем натурных наблюдений, анализ статистических данных методом экспертных оценок, планирование и проведение серий имитационных экспериментов по оценке среднего времени восстановления микропроцессорных систем железнодорожной автоматики.

Библиографический список

1. *Марюхненко В. С.* Модель количественной оценки безопасности интервального регулирования движения поездов / В. С. Марюхненко, Ю. Ф. Мухапад, Е. И. Антипин, А. А. Елгин // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2012. – № 3. – С. 230–238.
2. Анализ эксплуатационной деятельности хозяйства автоматики и телемеханики по итогам 2016 года. ОАО «Российские железные дороги» Управление автоматики и телемеханики Центральной дирекции инфраструктуры. – М., 2017. – 85 с.
3. *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.
4. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки. – Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2015 г. № 3168 р. – М.: ОАО «РЖД», 2015. – 129 с.
5. Регламент устранения нарушений нормальной работы устройств и систем СЦБ. – Утв. распоряжением МПС РФ от 26.03.2002 г. № ЦШЦ-15/7.
6. *Ваисов О. К.* Формализация технологических процессов электронного документооборота технической документации с помощью аппарата сетей Петри / О. К. Ваисов, П. Е. Булавский // *Сборник трудов конференции «Перспективы будущего в образовательном процессе».* – СПб.: ПГУПС, 2018. – С. 43–44.

7. *Ваисов О. К.* Моделирование технологических цепочек электронного документооборота технической документации на основе цветных иерархических временных сетей Петри / О. К. Ваисов // Научные труды республиканской научно-технической конференции с участием зарубежных ученых «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – 2018. – С 233–236.
8. *Frumin D.* Branching processes of conservative nested Petri nets / D Frumin, I. A. Lomazova // VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation – 2014. – Vol. 28. – P. 19–35.
9. *Wang S.* A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets / S. Wang, M. C. Zhou, Z. Li, C. Wang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2013. – Vol. 43, N 4. – P. 932–940.
10. *Buchina N.* The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets / N. Buchina, L. Dworzanski // Proceedings of the Spring/Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering. – М.: Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – P. 15–18.
11. *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, N. 1. – P. 59–71.
12. *Gang Niu.* Fault detection isolation and diagnosis of multi-axle speed sensors for high-speed trains / Gang Niu, Liuqing Xiong, Xiaoxiao Qin, Michael Pecht // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2019. – Vol. 131. – P. 183–198.
13. *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, N 2. – P. 210–217.
14. Сборник методик и алгоритмов поиска и устранения неисправностей в устройствах СЦБ. – Утв. распоряжением ЦДИ ОАО «РЖД» от 23.11.2015 г. – М.: ЦДИ ОАО «РЖД», 2015. – 315 с.
15. *Ходаковский В. А.* Моделирование технических задач сетями Петри в среде HPSi m / В. А. Ходаковский // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики: сб. науч. трудов. – СПб.: ПГУПС, 2013. – С. 41–51.
16. *Ермакова В. О.* Трансляция вложенных сетей Петри для верификации разверток / В. О. Ермакова, И. А. Ломазова // Труды ИСП РАН. – 2016 – Т. 28, № 4 – С. 115–136.
17. *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.
18. *Saren K. S.* State space properties of Flexible Manufacturing Cell based on Hierarchical Timed Colored Petri Nets / K. S. Saren, F. Blaga, T. Vtsselenyi // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 137, N 01012. – P. 1–6.
19. *Перникис Б. Д.* Предупреждение и устранение неисправностей в устройствах СЦБ / Б. Д. Перникис, Р. Ш. Ягудин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1994. – 254 с.
20. *Jensen K.* Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets / K. Jensen, L. M. Kristensen // In Coloured Petri Nets. – 2009. – P. 257–271.

21. Сапожников В. В. Надежность систем железнодорожной автоматики и телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, В. И. Шаманов. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.

P. E. Bulavsky

O. K. Vaisov

*Department of "Railway Automation and Remote Control on Railways"
Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint Petersburg*

MODELING AND ESTIMATION OF FAILURE DETECTION PERIOD IN SYSTEMS OF RAILWAY TRAFFIC INTERVAL CONTROL BASED ON HIERARCHY COLORED PETRI NETS

Statistical data analysis of failures in railway traffic interval control systems was carried out. Investigations on estimation of failure detection and elimination time were fulfilled taking into account the requirements to formalization of failure detection and elimination engineering processes in the signaling point of the numeric coded circuit blocking system by means of hierarchic colored temporary Petri nets. A simulation model of the system recovery time estimation according to the results of failure detection in the signaling point was elaborated by means of the analysis on the condition of facilities, as well as statistic and regulatory documents. The methods of Petri net theory based on the discrete-event paradigm of simulation modeling were applied. Moreover, the information method of failure detection and elimination in the facilities of railway automation and remote control systems was used. The elaborated simulation model makes it possible to estimate the average time for system recovery after failure occurrence in the signaling point of the numeric coded circuit blocking system. The settings of timing parameters for failure detection technological process (notice time, arrival time, failure detection and fault elimination time) can be carried out by means of the model in question. In order to provide a proper estimation of the above-mentioned parameters, taking into account the specificities of the local division and operating staff qualifications, there is a function to assign both deterministic and probabilistic firing of Petri net transitions.

Automatic block system, failure, fault, hierarchic colored temporary Petri nets, labels, points, transitions, inhibitory bows, events, conditions

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-3-356-376

References

1. Maryukhnenko V. S., Mukhapad Yu. F., Antipin E. I. & Elgin A. A. (2012) Model kolichestvennoy otsenky bezopasnosti intervalnogo regulirovaniya dvizheniya poezdov [The quantitative estimate model of railway traffic interval control security]. *Sovremenniyе tekhnologii. Sistemny analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2012, no. 3, pp. 230–238. (In Russian)
2. *Analiz ekspluatatsionnoy deyatelnosti khozyaistva avtomatiki i telemekhaniky po itogam 2016 goda* [The analysis of operational activity of automation and remote control facilities in 2016]. OAO "Rossiyskiye zhelezniye dorogi" Upravleniye avtomatiki i

- telemekhaniky Tsentralnoy direksii infrastruktury [OAO “Russian Railways” the Department of “Railway Automation and Remote Control” Central Directorate of Railway Infrastructure. Moscow, 2017, 85 p. (In Russian)]
3. *Bochkarev S. V. & Lykov A. A. (2013) Atomatizatsiya algoritma poiska otkazov v strelochnom elektroprivode s dvukhprovodnoy skhemoy upravleniya [Automation of failure search algorithm in the electric switch mechanism with double-wire control circuit]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of Petersburg State Transport University], 2013, no. 4, pp. 100–107. (In Russian)*
 4. *Instruktsiya po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu ustroystv i sistem signalizatsii, tsentralizatsii i blokirovki [Maintenance instruction on automatic train signaling facilities and systems]. Utverzhdena rasporyazheniyem OAO “RZhD” ot 30.12.2015 g., N 3168 p. [Approved by OAO “Russian Railways” regulation dated December 30th, 2015, N 3168 p.]. Moscow, OAO “RZhD” Publ., 2015, 129 p. (In Russian)*
 5. *Reglament ustraneniya narusheniy normalnoy raboty ustroystv i sistem STsB [Order on elimination of failures in proper operation of signaling facilities and systems]. Utverzhdena rasporyazheniyem MPS RF ot 26.03.2002 g., N TsShTs-15/7 [Approved by the regulation of the RF Ministry of Railways dated March, 26th 2002, N TsShTs-15/7. (In Russian)*
 6. *Vaisov O. K. & Bulavsky P. E. (2018) Formalizatsiya tekhnologicheskikh protsessov elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii s pomoshchyu apparata setey Petry [Formalization of operating procedures for electronic circulation of technical documents based on Petri net model]. Sbornik trudov konferentsii “Perspektivy budushchego v obrazovatelnom protsesse” [Collected papers of the Conference “Future prospects in educational process”]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 2018, pp. 43–44. (In Russian)*
 7. *Vaisov O. K. (2018) Modelirovaniye tekhnologicheskikh tsepohek elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii na osnove tsvetnykh ierarkhicheskikh vremennykh setey Petry [Modeling of process flows for electronic circulation of technical documents based on colored hierarchy temporary Petri nets]. Nauchniye Trudy respublikanskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s uchastiem zarubezhnykh uchenykh “Resursosberegayushchiye tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte” [Research papers of the Republican Research and Technical Conference involving foreign scholars “Resource-saving technologies for railway transport”], 2018, pp. 233–236. (In Russian)*
 8. *Frumin D. & Lomazova I. A. (2014) Branching processes of conservative nested Petri nets. VPT 2014. Second International Workshop on Verification and Program Transformation, 2014, vol. 28, pp. 19–35.*
 9. *Wang S., Zhou M. C., Li Z. & Wang C. (2013) A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics: systems, 2013, vol. 43, no. 4, pp. 932–940.*
 10. *Buchina N. & Dworzanski L. (2013) The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. Proceedings of the Spring/Summer Young Researchers’ Colloquium on Software Engineering. Moscow, Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences Publ., 2013, pp. 15–18.*

11. Cabral F. G., Moreira M. V. & Diene O. (2015) A Petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata. *Transaction on Automatic Control*, 2015, vol. 61, no. 1, pp. 59–71.
12. Niu G., Xiong L., Qin X. & Pecht M. (2019) Fault detection isolation and diagnosis of multi-axle speed sensors for high-speed trains. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 131, pp. 183–198.
13. Shen Q., Qiu J., Liu G. & Lv K. (2016) Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model. *Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 210–217.
14. *Sbornik metodik i algoritmov poiska i ustraneniya neispravnostey v ustroistvakh STsB [Collection of methods and algorithms for detection and repair of failures in signaling devices]*. Utverzhdena rasporyazheniyem TsDI OAO "RZhD" [Approved by the regulation of TsDI (Central Directorate of Railway Infrastructure) OAO "Russian Railways"] dated November 23rd, 2015. Moscow, TsDI OAO "RZhD" Publ., 2015, 315 p. (In Russian)
15. Khodakovskiy V. A. (2013) Modelirovaniye tekhnicheskikh zadach setyamy Petry v srede HPSim [HPSim-based modeling of engineering tasks by means of Petri nets]. *Aktualniye voprosy razvitiya system zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki [Topical issues of railway automation and remote control systems development]*: collection of research papers. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., 2013, pp. 41–51. (In Russian)
16. Ermakov V. O. & Lomazova I. A. (2016) Translyatsiya vlozhennykh setey Petry dlya verifikatsii razvertok [Translation of nested Petri nets for verification of branching bits]. *Trudy ISP RAN [Proceedings of Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences]*, 2016, vol. 28, no. 4, pp. 115–136. (In Russian)
17. Bulavskiy P. E. & Vaisov O. K. (2018) Modelirovaniye protsessov elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii s pomoshchyu setey Petry [Modeling of electronic circulation processes of technical documents via Petri nets]. *Avtomatika na transporte [Transport automation]*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 687–705. (In Russian)
18. Saren K. S., Blaga F. & Vtsselenyi T. (2017) State space properties of Flexible Manufacturing Cell based on Hierarchical Timed Colored Petri Nets. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 137, no. 01012, pp. 1–6.
19. Pernikis B. D. & Yagudin R. Sh. (1994) Preduprezhdeniye i ustraneniye neispravnostey v ustroistvakh STsB [Prevention and elimination of failures in signaling devices]. 2nd edition revised and enlarged. Moscow, Transport Publ., 1994, 254 p. (In Russian)
20. Jensen K. & Kristensen L. M. (2009) Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets. *In Coloured Petri Nets*, 2009, pp. 257–271.
21. Sapozhnikov V. V., Sapozhnikov V. Vl. & Shamanov V. I. (2003) Nadezhnost system zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki i svyazy [Security of railway automation, remote control and telecommunication systems]. Moscow, Marshrut [Route] Publ., 2003, 263 p. (In Russian)

Статья представлена к публикации членом редколлегии В. А. Ходаковским
Поступила в редакцию 27.11.2019, принята к публикации 04.03.2020

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич – 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

© Булавский П. Е., Ваисов О. К., 2020