
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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Рассматривается определение области применения аппарата сетей Петри для формализации технологических процессов с учетом особенностей электронного документооборота технической документации, разработка имитационной модели для оценки качества технической документации на устройства систем железнодорожной автоматики и телемеханики путем анализа временных параметров выполнения технологических процессов. Используются методы теории сетей Петри, которая базируется на дискретно-событийной парадигме. Разработаны требования к средствам моделирования и классификация различных расширений сетей Петри, формализованы технологические цепочки процессов ЭДТД на базе цветных временных сетей Петри и упрощенная ИМ с использованием иерархических временных цветных сетей Петри для оценки качества технической документации технологических процессов электронного документооборота технической документации.

Представленные упрощенные модели технологических процессов электронного документооборота технической документации и возможности предложенной ИМ на базе аппарата сетей Петри дают возможность оценить качество электронного документооборота технической документации путем анализа состояния и фиксации времени выполнения операций. ИМ дает возможность определять проблемные участки технологических процессов при анализе состояния сетей Петри, в конечном итоге выработать рекомендации по снижению временных затрат на проектирование, проведение пусконаладочных работ и ведение комплекта технической документации, в целом способствуя повышению ее качества.

электронный документооборот технической документации, цветные сети Петри, качество технической документации, маркировка, позиции, переходы, дуги, события, условия, иерархия, вложенность.

DOI: 10.20295/2412-9186-2019-5-3-375-390

Введение

Оценка параметров электронного документооборота технической документации (ЭДТД) систем железнодорожной автоматики и телемеханики

(СЖАТ) предполагает выполнение системных исследований методом имитационного моделирования с учетом территориальной распределенности средств ЭДТД, временной продолжительности реализации проектов СЖАТ, большого числа участников, решающих разнородные задачи [1].

Существенное влияние на все процессы жизненного цикла СЖАТ оказывает качество технической документации (ТД), под которым понимается весь объем признаков и характеристик ТД, относящихся к ее способности удовлетворять установленные потребности [2].

В данной статье рассматриваются основные требования, предъявляемые к методам и средствам моделирования технологических процессов ЭДТД, а также классификация различных расширений сетей Петри (СП). Оценка качества ТД выполнена путем формализации на базе методологии СП и имитационного моделирования с применением возможностей среды моделирования CPN Tools.

Система CPN Tools является специальной средой моделирования, которая использует аппарат СП и язык функционального программирования CPN ML [3].

1. Основные положения

В соответствии с предложенными определениями ТД в статье [4] сформулированы требования к методам и моделям ЭДТД для моделирования при помощи аппарата СП:

1. Формализация ЭДТД с учетом их особенностей, таких как территориальная распределенность средств ЭДТД, большая продолжительности реализации проектов СЖАТ, значительное число участников, решающих разнородные задачи, и влияние качества ТД на процессы ЭДТД.
2. Моделирование иерархических структур с возможностью представления многоуровневой структуры, в которой выделяются сети различного уровня.
3. Вложенность, т. е. возможность замещать одним переходом СП несколько сетей, характеризующих технологические цепочки ЭДТД.
4. Задание детерминированного или вероятностного характера времени выполнения технологических цепочек ЭДТД.
5. Выполнение процедур перехода от материалов обследования деятельности предприятия, представленных с учетом требований стандарта IDEF, к имитационному моделированию процессов ЭДТД.

6. Наличие возможности анализа параллельных технологических процессов ЭДТД.
7. Простота выполнения процедур, анализ сложных систем массового обслуживания.
8. Возможность наглядного представления процессов выполнения технологических цепочек.
9. Наличие инструментальных средств диагностирования и отладки имитационных моделей на базе методологии СП.
10. Относительная простота алгоритмизации и программной реализации технологических цепочек ЭДТД.
11. Формализация множества операций и проверок логических условий.

На базе этих требований был проведен анализ существующих методов формализации и инструментальных средств ИМ технологических процессов ЭДТД. Он показал, что GPSS World является эффективным инструментом имитационного моделирования, свободным от ограничений аналитических и численных методов, с нестандартной обработкой данных и снимающим с программиста множество нетривиальных проблем программирования и отладки моделей. Но следует отметить некоторые серьезные недостатки: отсутствие визуального представления схемы технологической линии; отсутствие возможности регулирования темпа автоматического моделирования; невозможность простого отслеживания технологических процессов; медленное пошаговое продвижение транзактов, что при моделировании в среде требует высокой квалификации программиста.

2. Классификация расширений сетей Петри

Рассмотрим классификацию СП для выявления наиболее подходящих для целей моделирования технологических цепочек ЭДТД. Она представлена в виде схемы (рис. 1).

Все виды элементарных СП являются модификациями классической, т. е. простыми СП [5]. Данная сеть – наиболее универсальная из всех элементарных.

В автоматной СП каждый переход имеет ровно одно входное и ровно одно выходное место. Автоматные сети, как правило, формализуют последовательные процессы с ветвлением по условию.

В синхронизационных графах у каждой позиции есть не более одного входа и не более одного выхода. При помощи этой сети производится моделирование последовательно-параллельных процессов.

WF-сеть является подклассом СП и сетью потоков работ. Она применяется для проверки графов потоков работ на существование определенных структурных конфликтов, таких как «тупики» и «недостатки синхронизации». Структурные конфликты не наблюдаются, если выполняется условие бездефектности WF-сети.

Сеть свободного выбора характеризуется тем, что каждая дуга, выходящая из позиции, это либо единственный выход из нее, либо единственный вход в переход. Такие сети применяются для формализации процессов управления.

Ингибиторные СП содержат дуги определенного типа – так называемые ингибиторные дуги, которые препятствуют срабатыванию перехода, если во входной позиции, связанной с переходом ингибиторной дугой, находится фишка. Такие сети используются в случаях, когда необходимо выполнить проверку маркировки позиции на ноль.

Элементарные сети Петри либо являются универсальными алгоритмическими системами, либо требуют для представления ряда объектов составления моделей, размер которых стремится к бесконечности. В частности, это можно сказать о простых СП, поскольку любая иерархическая цветная СП может быть заменена простой сетью Петри бесконечной размерности. Один из главных недостатков классических СП – невозможность моделирования любого произвольного объекта [6].

Особенностью специальных СП является высокая сложность их устройства. Специальные сети имеют характеристики, позволяющие точнее определять те или иные свойства реальных объектов и систем.

Временные сети Петри используются при моделировании изменения состояния объекта с течением времени. На практике процессы не протекают мгновенно, потому необходимо учитывать и фиксировать их продолжительность. Такие возможности предоставлены во временных СП и других, основанных на комбинировании различных расширений сетей.

Стохастические СП предназначены для учета специфических особенностей, например вероятностного характера многих событий, имеют ряд расширений, таких как детерминированные, обобщенные, флюидные и гибридные. Однако следует обратить внимание и на недостаток, так как при моделировании сложных объектов для ряда прикладных задач, в частности в системах поддержки принятия решений, одной из проблем становится обеспечение предсказуемости [7], т. е. одинакового результата работы при одних и тех же входных данных. Стохастические СП не обладают свойством предсказуемости, следовательно, их практическое применение ограничено.

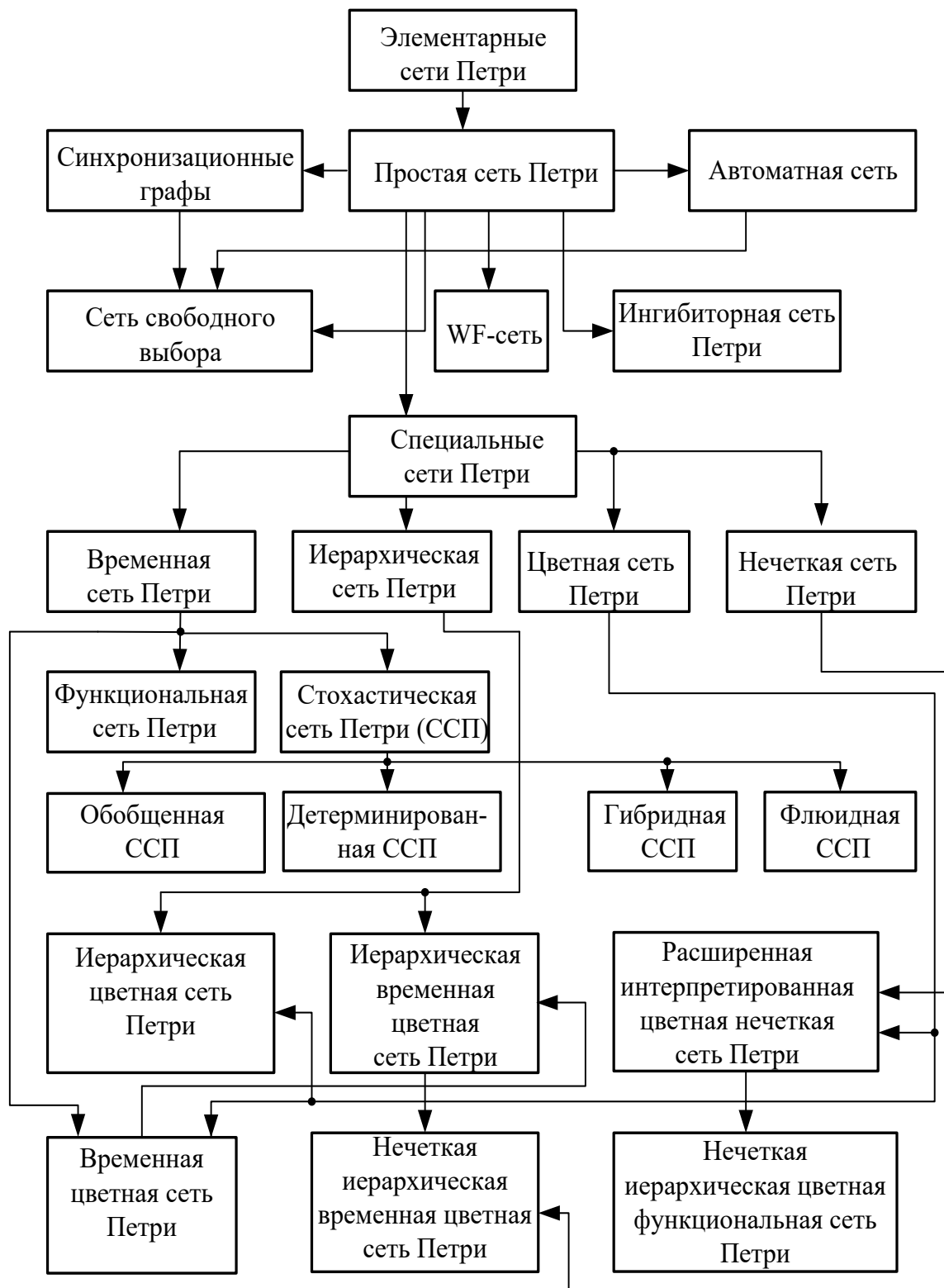


Рис. 1. Классификация сетей Петри

Функциональные СП необходимы для вычислений в сети при выявлении определенных параметров (времени задержки). Это может быть весьма

эффективно с практической точки зрения, поэтому целесообразно внедрять свойства функциональных СП в другие их виды.

Наиболее весомым видом СП являются цветные (раскрашенные) СП, так как они преобразуют дискретное множество фишек (меток) в непрерывное. Более того, каждая фишка в них может быть объектом со сложной структурой. Такие возможности предоставляют бóльшую гибкость для создания имитационных моделей объектов и систем в целом.

Иерархические СП используются при описании сложных объектов, так как модель разбивается на уровни иерархии. Такая возможность позволяет упростить процесс проектирования и анализа.

Потребность в нечетких СП возникли из-за необходимости моделировать объекты, у которых определенные параметры и особенности характера протекающих процессов невозможно строго формализовать. Однако специальные СП позволяют моделировать множество видов объектов и систем в сравнении с классическими (элементарными) СП, они также относятся к универсальным алгоритмическим системам.

Комбинированные СП отличаются наибольшей сложностью. Они формируются путем взаимодействия различных видов специальных СП и обладают свойствами и характеристиками всех «предшественников». Так, иерархическая цветная СП есть комбинация иерархических и цветных СП и обладает всеми преимуществами и тех и других [8].

Временные цветные СП применяются, когда необходимо моделировать изменение состояния во времени объекта, который обладает рядом свойств и характеристик, не являющихся дискретными величинами.

Иерархические цветные СП используется вместо цветных СП тогда, когда моделируемая система или объект состоит из большого количества частей, связанных между собой отношениями подчинения [9].

Иерархические временные цветные СП (ИВЦСП) являются универсальной алгоритмической системой, так как они предоставляют возможность проектировать и моделировать каждый произвольный объект или систему любой сложности.

Анализ различных расширений СП и требования к ним позволили определить, что преимущества иерархических цветных СП достаточны для полноценной формализации технологических процессов ЭДТД и в конечном итоге могут дать возможность для адекватной оценки качества ТД.

3. Формализация документооборота с помощью сетей Петри

В соответствии с требованиями к СП оценку качества технологических процессов ЭДТД целесообразно производить на базе иерархических цветных СП с временными ограничениями. Реальные технологические процессы ЭДТД имеют конечную продолжительность, что может быть изображено графически на временных графиках. Согласно [10], временные цветные СП задаются следующим набором:

$$TCPN = (P, T, A, \Sigma, N, C, G, E, I),$$

где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ – конечное множество позиций, т. е. условий, при которых будет выполнена технологическая операция ЭДТД; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ – 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 $P \times T \cup T \times P$; $C: P \rightarrow \Sigma$ – 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 :

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

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

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

Var обозначает набор переменных в выражении $expr$.

В статье [11] выделены технологические цепочки, соответствующие стадийности выполнения работ от их начала до завершения строительства и ввода СЖАТ в эксплуатацию. Под технологической цепочкой понимается функционально завершенная последовательность операций над комплектом ТД. На основании этих данных построена условная модель технологической цепочки ЭДТД на базе цветных СП с временными ограничениями (рис. 2). В данной модели приняты в соответствии с результатами [12] и с синтаксисом языка CPN ML атрибуты позиции в виде выражения

$1'2++1'3++1'4$, которое задает начальную маркировку позиций (фишек), состоящую из трех меток: одна метка со значением 2, одна метка со значением 3 и одна метка со значением 4.

С учетом особенностей технологических процессов ЭДТД фишки имеют временной характер. Для задания временных свойств фишек использовано следующее обозначение:

$$\text{closet } tED = \text{int } \text{timed},$$

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; *tED* – обозначение нового типа данных; *int* – название типа данных (*integer*). Атрибутом дуг ЦВСП служит переменная *k*, необходимая для переноса соответствующих фишек между позициями и переходами. Переменная *k* объявлена следующим образом: *var: k: tED* (см. рис. 2). Возможности среды моделирования CPN Tools позволяют задавать временные задержки срабатывания переходов и перемещения фишек через дуги путем задания случайной величины, распределенной по некоторому закону [13]. Так для дуги обратной связи на рис. 2 от перехода *T2* к позиции *P1* используется функция экспоненциального закона распределения случайных величин, параметры которого выбраны случайным образом:

$$1'2++1'3++1'4@+\text{ceil}(\text{exponential}(0,7)).$$

Значения множества переходов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение множества переходов

Обозначение перехода	Описание перехода
<i>T1</i>	Выдача технического задания и технических условий по запросам
<i>T2</i>	Проектирование утверждаемой части проектно-сметной документации (ПСД)
<i>T3</i>	Согласование и утверждение утверждаемой части ПСД
<i>T4</i>	Проектирование ПСД
<i>T5</i>	Отправка и экспертиза ПСД
<i>T6</i>	Изготовление, строительство и проведение пусконаладочных работ
<i>T7</i>	Введение и архивирование ТД

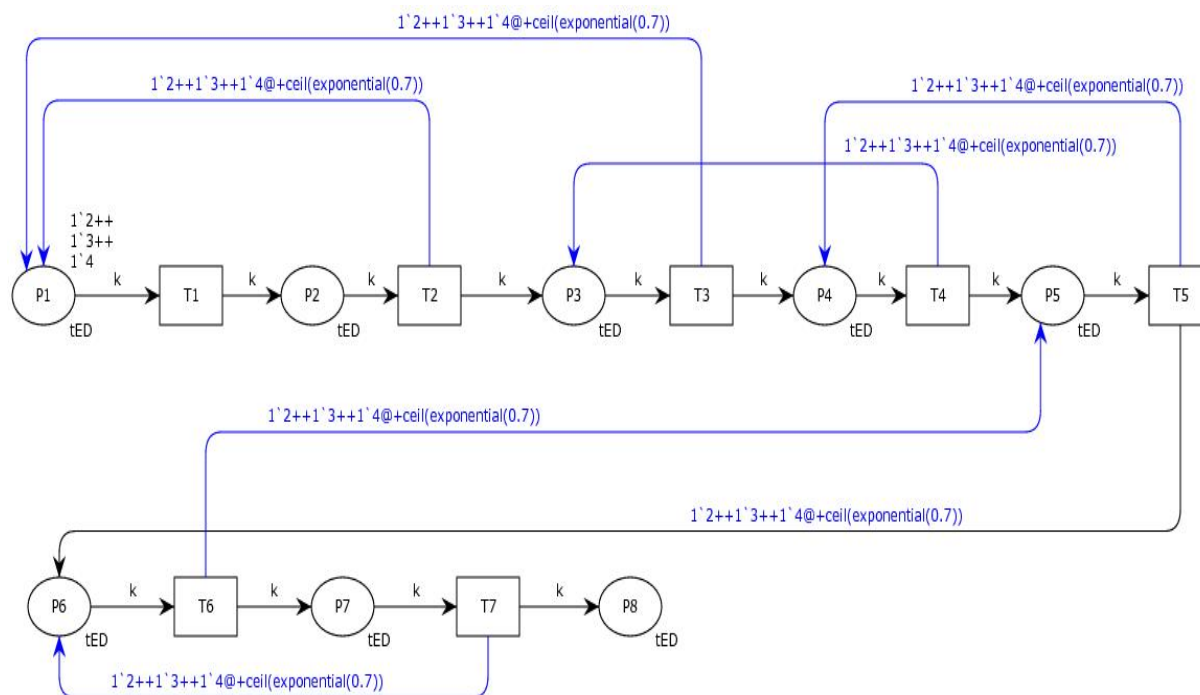


Рис. 2. ЦВСП технологической цепочки алгоритмов ЭДТД

Описание множества позиций, т. е. условий, при которых выполняются технологические операции ЭДТД, приведено в табл. 2.

Таблица 2
Значение множества позиций

Обозначение позиции	Описание позиции
<i>P1</i>	Наличие технического задания и технических условий
<i>P2</i>	Проверка выданных технического задания и технических условий по запросам и начало выполнения проектирования ПСД
<i>P3</i>	Наличие утверждаемой части ПСД
<i>P4</i>	Наличие ТД, согласованной и утвержденной утверждаемой части ПСД и проектирование ПСД
<i>P5</i>	Наличие проекта и отправка на экспертизу ПСД
<i>P6</i>	Заключение экспертизы ПСД и начало строительства
<i>P7</i>	Завершение проведения пусконаладочных работ с учетом регламентных процедур
<i>P8</i>	Наличие ТД для ведения и архивирования на дистанции автоматики и телемеханики

Таким образом, в соответствии с [14] CPN Tools поддерживает функциональный язык программирования ML, который необходим для описания переменных, условий и функций, с помощью которых формулируются

логические условия, временные характеристики и другие свойства технологических процессов ЭДТД. Наличие временных фишек (меток) позволяет моделировать технологические процессы ЭДТД с учетом времени их выполнения для оценки качества ТД [15].

4. Иерархическая имитационная модель сетей Петри для документооборота

Согласно концептуальной модели, предложенной в [16], и иерархической структуре технологических операций ЭДТД, при проектировании ТД разработаны иерархические ЦВСП на базе среды моделирования CPN Tools (рис. 3).

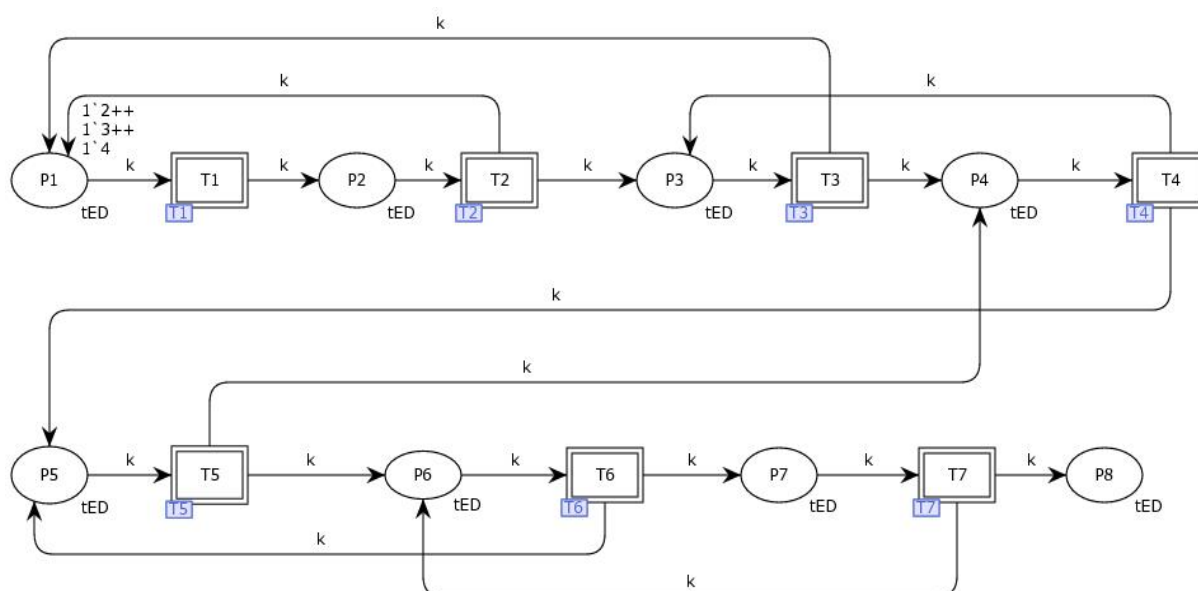


Рис. 3. Иерархические ЦВСП технологической цепочки алгоритмов ЭДТД

На рис. 4 представлена модель подстановочного перехода $T5$ (см. рис. 3). Позиция *In* является входной, ей соответствует позиция $P9$ модели верхнего уровня, позиции *Out* – выходные, им отвечают позиции $P4$ и $P6$.

Возможности ИЦВСП позволяют производить разработку сложных ИМ технологических процессов ЭДТД путем замещения их одним переходом, характерным для определенной степени детализации алгоритмических уровней, так как алгоритмические уровни представляют собой конкретную степень детализации элементарных технологических процессов. Таким образом реализуются вложенные СП в соответствии со сформулированными

требованиями. Из рис. 4 следует, что все переходы имеют вложенную структуру. В качестве примера рассмотрим процесс оценки времени выполнения технологических операций ЭДТД на Тихвинской дистанции сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) ШЧ-8. Результаты обследования приведены в статье [17]. Так как разработанная ИМ является универсальной, настроим ее в соответствии с полученными в ходе обследования результатами. Для определения условий срабатывания соответствующих переходов, отвечающих за конкретные технологические операции ($T1, T2, T3, T4, T5$), воспользуемся функцией равномерного закона распределения (*uniform*) случайных величин. Пример записи условий срабатывания перехода $T2$ выглядит следующим образом:

$$1 \cdot 1 @ + \text{ceil}(\text{uniform}(4.0, 16.0)).$$

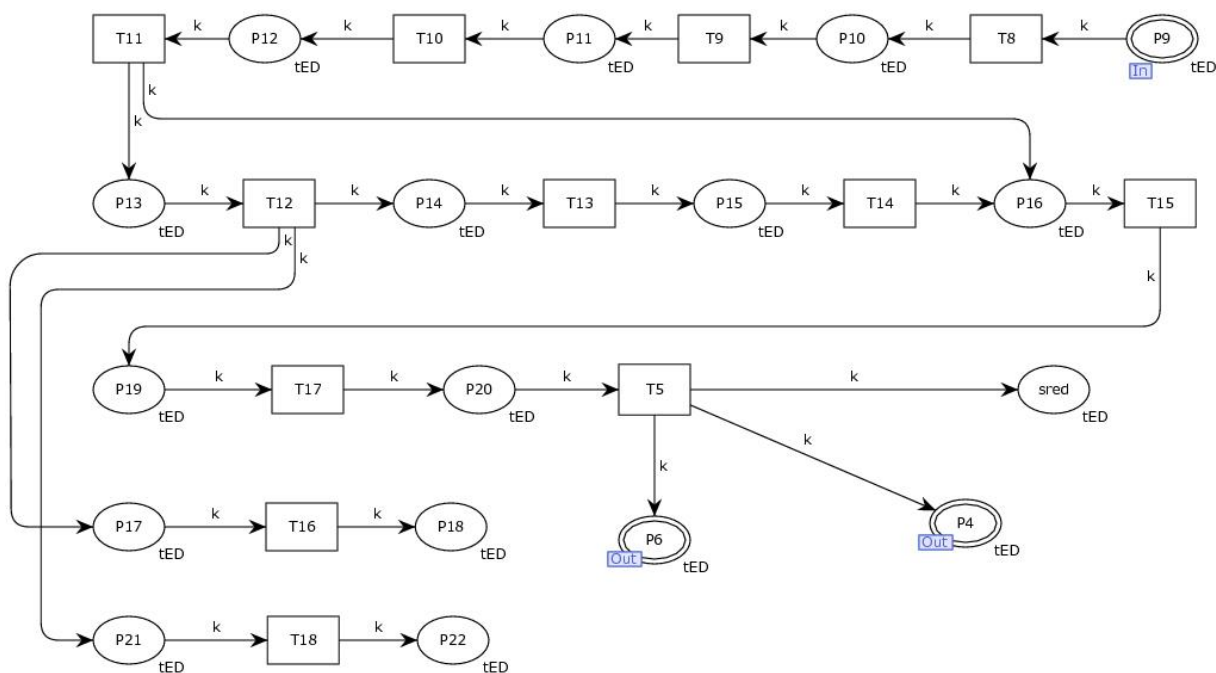


Рис. 4. Вложенная модель перехода $T5$ ИЦВСП технологической цепочки алгоритмов ЭДТД

Результаты исследования на ИМ ЭДТД приведены в табл. 3. Функции программного комплекса CPN Tools позволяют осуществлять моделирование как в пошаговом режиме, так и в автоматическом. Одна единица модельного времени приравнивается к одной неделе реального времени.

Таблица 3
Результаты исследования на ИМ ЭДТД

Наименование технологических процессов	Продолжительность работы (в неделях)
Формирование технического задания и технических условий	2
Проектирование утверждаемой части ПСД	2
Согласование и утверждение утверждаемой части ПСД	2
Проектирование ПСД	15
Отправка и экспертиза ПСД	3
Изготовление, строительство и проведение пусконаладочных работ	14
Ведение и архивирование ТД	2
Итого	40

Заключение

Сети Петри позволяют решать задачи определения причинно-следственных связей и структурирования процессов ЭДТД. Оценка количественных характеристик технологических цепочек ЭДТД при этом, как правило, довольно сложная, так как воздействующих на ЭДТД факторов очень много. В связи с этим модели, разработанные на базе аппарата СП, целесообразно использовать для решения специфических задач при моделировании ЭДТД. Методологию СП можно применять для решения широкого круга задач по выявлению взаимосвязей структуры технологических цепочек ЭДТД, оценке качества ТД путем получения временных параметров срабатывания переходов и движения фишек, верификации и валидации имитационных моделей ЭДТД.

Для синтеза ИМ разработаны требования к СП с учетом особенностей технологических процессов ЭДТД. Проведен анализ существующих расширений СП для решения проблемы создания ИМ, позволяющих оценивать качество ТД, в результате построена классификация СП. При анализе особенностей различных расширений СП установлено, что иерархические ЦВСП наиболее полно соответствуют разработанным требованиям. С помощью аппарата иерархических ЦВСП и их особенностей формализованы технологические процессы ЭДТД. На базе инструментального средства *CPN Tools* и встроенного функционального языка программирования разработана упрощенная ИМ, позволяющая оценивать время выполнения технологических операций при проектировании ТД для систем СЖАТ. Для рассмотренного примера оценка временных параметров процесса ЭДТД занимает 40

недель (см. табл. 3). Путем анализа временных параметров срабатывания переходов и особенностей логики СП выявляются наиболее затратные с точки зрения времени выполнения технологические цепочки электронного документооборота, что позволяет принять меры для снижения временных затрат.

Следующими этапами выполнения работ по исследованию ИМ ЭДТД на базе иерархических ЦВСП являются: 1) определение временных параметров выполнения технологических процессов ЭДТД в реальных условиях путем натурных исследований или при помощи анализа соответствующих статистических данных; 2) планирование и проведение серий имитационных экспериментов для оценки выбранных показателей качества ЭДТД.

Библиографический список

1. Василенко М. Н. Организация электронного документооборота при проектировании систем автоматики и телемеханики / М. Н. Василенко, Б. П. Денисов, П. Е. Булавский, В. Г. Трохов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщения. – 2007. – Вып. 3. – С. 16–29.
2. Булавский П. Е. Метод оценки времени выполнения процессов и адекватности имитационной модели электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 45–56.
3. Скородумов П. В. Анализ перспективных расширений сетей Петри / П. В. Скородумов // Наука и мир. – 2014. – Т. 1. – № 10. – С. 66–68.
4. Булавский П. Е. Метод оценки времени выполнения процессов электронного документооборота технической документации / П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Развитие элементной базы и совершенствование методов построения устройств железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. трудов ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : ПГУПС, 2014. – С. 64–69.
5. Симанков В. С. Моделирование сложных объектов в режиме реального времени на основе сетей Петри / В. С. Симанков, Д. М. Толкачев // Вестник Адыгейск. гос. ун-та. – 2012. – Вып. 4. – С. 202–209.
6. Устимов К. О. Автоматизация построения иерархической имитационной модели бизнес-процессов в виде раскрашенных сетей Петри на основе модели IDEF0 / К. О. Устимов // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – С. 90–94.
7. Устимов К. О. Алгоритм преобразования IDEF0-модели в раскрашенную сеть Петри / К. О. Устимов, Н. В. Федоров // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – С. 321–327.
8. Kulagin V. P. Tensor methods of designing computer system structures / V. P. Kulagin // Automatic Control and Computer Sciences. Ed by – New York, 1989. – P. 55–61.
9. 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. – P. 19–35.
10. Jensen K., Kristensen L. M. Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets. In Coloured Petri Nets; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2009. – Pp. 257–271.

11. Wang S., Zhou M. C., Li Z., Wang C. A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, July 2013, Vol. 43, no. 4. – Pp. 932–940.
12. The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets. In *Proceedings of 7th the Spring / Nina Buchina and Leonid Dworzanski // Summer Young Researchers' Colloquium on Software Engineering, SYRCoSE '13*. Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences, 2013. – Pp. 15–18.
13. Cabral F. G., Moreira M. V., Diene O. 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.
14. Q. Shen, J. Qiu, G. Liu, and K. Lv. Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model. *Eksplotacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability*, 2016, Vol. 18, no. 2. – Pp. 210–217.
15. 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.
16. Булавский П. Е. Концептуальная модель электронного документооборота технической документации / Булавский П. Е. // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 1. – С. 60–63.
17. Добряков И. А. Анализ документооборота дистанции СЦБ на основе международных стандартов / И. А. Добряков, П. Е. Булавский, Д. С. Марков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015 – № 2. – С. 39–47.

*Peter E. Bulavsky,
Oleg K. Vaisov*

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

MODELING OF ELECTRONIC TECHNICAL DOCUMENTATION MANAGEMENT PROCESSES WITH THE HELP OF PETRI NETS

Consideration is given to determining the scope of application of the Petri nets apparatus for the formalization of technological processes, taking into account the features of electronic document circulation of technical documentation (EDTD), the development of a simulation model (IM) for assessing the quality of technical documentation on devices of railway automation and telemechanics systems analysis of the time parameters of the implementation of technological processes. The methods used in the theory of Petri nets (SP) are used, which is based on the discrete-event paradigm of IM. Requirements for modeling tools and classification of various JV extensions were developed, technological chains of EDTD processes based on color temporary Petri nets and simplified MI using hierarchical temporal color Petri nets to assess the quality of technical documentation of technological EDTD processes were formalized. The presented simplified models of the technological processes of EDTD and the possibilities of the proposed MI based on the apparatus of Petri nets make it possible to assess the quality of the EDTD by analyzing the state and fixing the execution time of operations. MI makes it possible to identify problem areas of technological processes when analyzing the state of Petri nets, ultimately to develop recommendations for reducing the time spent on

design, commissioning and maintenance of a set of technical documentation, generally contributing to improving its quality.

electronic document flow of technical documentation, colored Petri nets, quality of technical documentation, marking, positions, transitions, arcs, events, conditions, hierarchy, nesting.

Reference

1. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavskiy P. Ye., Trokhov V. G. (2007) Organization of electronic document management in the design of automation and remote control systems [Organizatsiya elektronnoho dokumentooborota pri proyektirovanii sistem avtomatiki i telemekhaniki], Proceedings St. Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]. – St. Petersburg, vol.1. – Pp. 16–29.
2. Bulavsky P. E., Markov D. S. (2014) A method for estimating the execution time of processes and the adequacy of the simulation model of electronic document management of technical documentation [Metod otsenki vremeni vypolneniya protsessov i adekvatnosti imitatsionnoy modeli elektronnoho dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii], Automation of Transport [Avtomatiki na transporte], vol. 2. – Pp. 45–56.
3. Skorodumov P. V. (2014) Analysis of perspective extensions of Petri nets [Analiz perspektivnykh rasshireniy setey Petri], Science and Peace [Nauka i mir]. Vol 1, issue 10. – Pp. 66–68.
4. Bulavsky P. E., Markov D. S. (2014) Method for estimating the time taken to complete electronic document management processes of technical documentation [Metod otsenki vremeni na vypolneniya protsessov elektronnoho dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii], Development of the element base and improvement of methods for constructing railway automation and telemechanics devices, Edition VI. V. Sapozhnikov. St. Petersburg, Proceedings St. Petersburg state transport university [PGUPS]. – Pp. 64–69.
5. Simankov V. S., Tolkachev D. M. (2012) Simulation of complex objects in real time based on Petri nets [Modelirovaniye slozhnykh obyektoy v rezhime realnogo vremeni na osnove setey Petri], Adyghe State University [Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta], Vol. 4. – Pp. 202–209.
6. Ustimov K. O. (2014) Automation of constructing a hierarchical simulation model of business processes in the form of colored Petri nets based on the IDEF0 model [Avtomatizatsiya postroyeniya iyerarkhicheskoy imitatsionnoy modeli biznes-protsessov v vide raskrashennykh setey Petri na osnove modeli IDEF0], Mining information analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten']. – 2014. – Pp. 90–94.
7. Ustimov K. O., Fedorov N. V. (2014) The algorithm for converting the IDEF0 model into a colored Petri net [Algoritm preobrazovaniya IDEF0 modeli v raskrashennuyu set' Petri], Mining information analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskij byulleten']. – 2014. – Pp. 321–327.
8. Kulagin V. P. Tensor Methods of Designing Computer System Structures, Automatic Control and Computer Sciences. – New York, 1989. – Pp. 55–61.
9. Frumin D., Lomazova I. A. (2014) 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.
10. Jensen K., Kristensen L. M. (2009) Formal Definition of Timed Coloured Petri Nets. In Coloured Petri Nets; Springer: Berlin, Heidelberg, Germany, 2009. – Pp. 257–271.

11. Wang S., Zhou M. C., Li Z., Wang C. (2013) "A New Modified Reachability Tree Approach and Its Applications to Unbounded Petri Nets," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 43, issue 4. – Pp. 932–940, July 2013.
12. Nina Buchina and Leonid Dworzanski (2013) 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.
13. 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, issue 1. – Pp. 59–71
14. 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, issue 2. – Pp. 210–217.
15. 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*. 2016, vol. 28, issue 4. – Pp. 115–136.
16. Bulavskiy P. Y. (2011) A conceptual model of electronic document management technical documentation [Kontseptual'naya model' elektronnoy dokumentatsii], *Transport of the Russian Federation [Transport Rossijskoj Federatsii]*, vol. 1. – Pp. 60–63.
17. Dobryakov I. A., Bulavsky P. E., Markov D. S. (2015) Analysis of document flow of distance signaling on the basis of international standards [Analiz dokumentooborota distantsii STSB na osnove mezhdunarodnykh standartov], *Proceedings St. Petersburg state transport university [Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya]*. – St. Petersburg, Issue 2. – Pp. 39–47.

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.

pbulavsky@gmail.com

ВАЙСОВ Олег Кахрамонович – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I.

olegvaisov@gmail.com

© Булавский П. Е., Вайсов О. К., 2019