

Электронное моделирование

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

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Сети Петри являются перспективной методологией моделирования различных систем и процессов, в особенности бизнес-процессов в частности документооборота технической документации. В статье рассмотрена новая методика моделирования процессов электронного документооборота с учетом качества технической документации при помощи методологии временных сетей Петри с детерминированными задержками на срабатывания переходов. Приведено описание упрощенной модели электронного документооборота технической документации на устройства железнодорожной автоматики и телемеханики на основе аппарата сетей Петри. Упрощенная модель помогла разработать метод оценки качества технической документации на основе временных параметров процесса электронного документооборота. Показана возможность использования полученной модели сети Петри в качестве альтернативной для выполнения процедур верификации и валидации имитационной модели электронного документооборота.

требования к моделям и методам электронного документооборота технической документации; классические сети Петри; детерминированные временные сети Петри, качество технической документации; маркировка; позиции; переходы; ребра; события; условия; входные и выходные функции

Введение

Комплексное внедрение электронного документооборота технической документации (ЭДТД), повышает эффективность проектирования, строительства и эксплуатации систем железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ), обеспечивает применение новых принципов стандартизации технической документации и организации взаимодействия проектных, строительных, эксплуатационных и ремонтных организаций.

В [1] выделяется целый ряд проблем теоретического, методического и прикладного характера, препятствующих активному внедрению средств автоматизации работ по моделированию бизнес-процессов, в частности документооборота технической документации.

В связи с зависимостью безопасности движения поездов от качества и своевременности подготовки технической документации, территориальной распределенностью средств ЭДТД систем ЖАТ, временной продолжительности реализации проектов систем ЖАТ и большим количеством участвующих в них организаций, решающих разнородные задачи, взаимосвязь документов (создание документов-последователей на основе данных, содержащихся в документах-предшественниках) делает процесс формализации и синтеза ЭДТД систем ЖАТ весьма сложным. Комплекс задач синтеза ЭДТД может решаться только на основе количественных оценок принимаемых решений с использованием современных методов формализации [2].

Одним из перспективных методов формализации описания и анализа сложных технологических процессов ЭДТД при проектировании систем ЖАТ является применение методологии сетей Петри (СП) – распространенного графического средства исследования систем. Популярность их вызвана удачным представлением различных типов объектов, присутствующих во многих моделируемых системах, и событийным подходом к моделированию. СП обладают наилучшими возможностями для описания взаимосвязей и взаимодействий параллельно протекающих процессов.

Целью статьи является определение целесообразности применения аппарата СП для формализации процессов с учетом требований ЭДТД, а также оценки качества технической документации на устройства систем ЖАТ. Объектом исследования является процесс моделирования ЭДТД, предметом – особенности использования методологии СП и оценка качества технической документации. Используются упрощенные модели технологической цепочки процесса ЭДТД на основе СП.

1 Основные положения

В соответствии с предложенными определениями технической документации (ТД) в [2] сформулированы требования к методам и моделям ЭДТД для моделирования при помощи аппарата СП:

1. Формализация ЭДТД с учетом его особенностей, таких как территориальная распределенность средств ЭДТД, временная продолжительность реализации проектов систем ЖАТ, большое число участников, решающих разнородные задачи, необходимость оценки качества ТД.

2. Моделирование иерархических структур и возможность представления многоуровневой структуры, где выделяются сети различного уровня.

3. Вложенность, т. е. возможность замещать одним переходом СП несколько сетей, характеризующих технологические цепочки ЭДТД.

4. Возможность задания детерминированного или вероятностного характера времени выполнения технологических цепочек ЭДТД.

5. Возможность выполнения процедур перехода от материалов обследования деятельности предприятия, представленной в виде стандарта IDEF, к имитационному моделированию (ИМ) процессов ЭДТД.

6. Наличие возможности анализа параллельных технологических процессов ЭДТД.

7. Простота выполнения процедур анализа 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 основе сформулированных выше требования был проведен анализ методов формализации и инструментальных средств ИМ технологических процессов ЭДТД. Анализ показал, что GPSS World является весьма ценным инструментом имитационного моделирования, свободным от ограничений аналитических и численных методов, с нестандартной обработкой данных, избавляющим программиста от множества нетривиальных проблем программирования и отладки моделей. Необходимо отметить и наличие у него ряда серьезных недостатков: моделирование в этой среде требует высокой квалификации; отсутствие визуального представления схемы технологической линии; отсутствие возможности регулирования темпа автоматического моделирования, так как невозможно отслеживание непосредственной реализации технологических процессов, а пошаговое продвижение транзактов является излишне медленным.

Обобщенная формализованная схема (ОФС) ЭДТД имеет иерархическую структуру. В связи с этим для полноценной оценки качества ТД в процессе выполнения технологических операций с учетом множества логических условий и их вероятностного характера возможно использование различных расширений СП, таких как временные, цветные (раскрашенные), а также их возможные комбинации. С учетом вышеуказанных особенностей ЭДТД для ИМ наиболее полной ОФС технологических процессов целесообразно использовать иерархические временные цветные СП.

Для предварительной формализации и разработки модели в данной статье будет рассматриваться упрощенная модель ЭДТД на базе временных СП с детерминированными задержками срабатывания переходов для оценки времени выполнения технологических операции с учетом качества ТД.

СП являются мощным инструментом исследования систем благодаря возможности описания дискретных, асинхронных, параллельных, распределенных процессов, наглядности представления их работы, развитому математическому и программному аппарату анализа. СП разрабатывались специально для моделирования тех систем, которые содержат параллельно взаимодействующие компоненты [3].

Дальнейшее развитие опыта применения в ЭДТД аппарата СП и их различных расширений дает возможность автоматизации синтеза ЭДТД систем ЖАТ. Для этого необходимы исследования различных расширений СП на предмет возможности применения существующих алгоритмов, преобразования статических моделей (IDEF0 и IDEF3) в соответствующие расширения СП с учетом качества ТД. Так, в [4–5] описаны принципы и алгоритмы преобразования функциональной модели бизнес-процессов IDEF0 в иерархическую имитационную модель в виде цветных СП. Следует отметить методы и средства формализации технологических процессов ЭДТД на языке параллельных логических схем алгоритмов (ПЛСА) и инструментальных средств GPSS. Несмотря на преимущество инструментальных средств GPSS и формального языка ПЛСА в настоящее время наблюдается отсутствие методик и программных средств автоматизированного параметрического отображения операторов и логических условий ПЛСА и наличие других нереализованных задач создания автоматизированных систем моделирования процессов ЭДТД. Также необходимо отметить развитие различных расширений СП, содержащих в себе полноценный язык моделирования CPN ML. Это язык моделирования высокого уровня, основанный на языке моделирования Standard ML, который отличается математически точным определением (гарантирующим идентичность смысла программ вне зависимости от компилятора и аппаратного обеспечения) и имеет доказанную надежность статической и динамической семантики. Принимая во внимание вышеуказанные особенности и требования, авторы данной статьи предлагают аппарат СП в качестве альтернативы формализации процессов ЭДТД в ПЛСА для дальнейшего исследования их на возможность оценки качества ТД с учетом временных параметров процессов и использования полученных результатов в последующих работах по автоматизации синтеза ЭДТД систем ЖАТ на языке моделирования CPN ML в инструментальной среде моделирования CPN TOOLS.

2 Использование сетей Петри для описания процессов электронного документооборота

Теория СП, впервые описанная в 1962 г. немецким математиком Карлом Петри, в настоящее время имеет широкое применение практически во всех отраслях научных исследований [6]. СП являются удобным математическим ап-

паратом для формализации, анализа и моделирования дискретно-событийных систем [7–8]. Из-за слабо связанной многоуровневой структуры СП могут использоваться для эффективного моделирования различных технологических процессов [9]. Методология СП широко используется для обнаружения неисправностей и диагностики дискретно-событийных систем [10–11].

Классическая СП состоит из четырех элементов: множество позиций P , множество переходов T , входная функция I и выходная функция O . СП представляет собой двудольный ориентированный граф, в котором позициям соответствуют вершины, изображаемые кружками, а переходам – вершины, изображаемые утолщенными черточками; входным функциям соответствуют дуги, направленные от позиций к переходам, а выходным функциям – направленные дуги от переходов к позициям. Таким образом, входная и выходная функции связаны с переходами и позициями. Входная функция I отображает переход t_j в множество позиций $I(t_j)$, называемых входными функциями перехода. Выходная функция O отображает переход t_j в множество позиций $O(t_j)$, называемых выходными позициями перехода.

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

В соответствии с [12] классическая СП C является четверкой, $C=(P, T, I, O)$, где $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – конечное множество позиций, т.е. условия, при которых выполняется технологическая операция ЭДТД, $n \geq 0$. $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – конечное множество переходов, $m \geq 0$. Множество позиций и множество переходов не пересекаются, $P \cap T = \emptyset$. $I: T \rightarrow P^\infty$ является входной функцией – отображением переходов в комплекты позиций. $O: T \rightarrow P^\infty$ есть выходная функция – отображение 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 СП. Фишка – это примитивное понятие СП. Фишки присваиваются позициям, и движение их наглядно показывает выполнение множество условий срабатывания. Таким образом, маркировка μ есть функция, отображающая множество позиции P во множество неотрицательных целых чисел N :

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

С учетом разметки позиций (маркировки) СП задаются пятеркой:

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

Использование дискретно-событийной парадигмы ИМ позволяет решить актуальную задачу создания и анализа модели технологического процесса [13] ЭДТД.

Моделирование системы СП основано на двух основополагающих понятиях и условиях. Под событием понимаются действия, имеющие место в системе. Возникновением событий управляет состояние системы. Состояние системы описывается множеством условий. Условие есть предикат, или логическое описание технологических процессов ЭДТД. Условие может принимать либо значения «истина», либо значение «ложь» [14]. Таким образом, модель СП служит для отображения и анализа причинно-следственных связей ТД в системе ЭДТД. Анализ результатов моделирования предполагает определения состояний, в которых находилась система ЭДТД.

Срабатывание определенного перехода t означает удаление по одной фишки (метки) из каждой позиции p_i , если существует дуга из p_i в t , и добавление метки в каждую позицию p_j , если имеется дуга t в p_j . Кратные метки необходимы для кратных входных дуг. В результате срабатывания во всех входных позициях перехода число меток уменьшается на величину, равную числу дуг, выходящих из соответствующей позиции в переход, а в выходные позиции данного перехода добавляется число фишек, равное числу дуг, исходящих из перехода в соответствующую выходную позицию. Введение ряда дополнительных правил и условий в алгоритмы моделирования позволяет получать ту или иную разновидность СП, для того чтобы моделировать не только последовательность технологических операций ЭДТД, но и привязку их ко времени. Это осуществляется приданием переходам веса – продолжительности (задержки) срабатывания, которую можно определять, используя задаваемый при этом алгоритм. Полученную при таком способе модель называют временной сетью Петри (ВСП).

Для отображения взаимодействия элементов технологических процессов ЭДТД во времени и пространстве в виде движения маркеров через позиции и переходы и их задержек на срабатывание СП открывает возможности оценки качества технологических процессов. Для временных, стохастических, ингибиторных, приоритетных и цветных СП устанавливают разные правила открывания переходов и задержки маркеров на позициях [15].

3 Упрощенная имитационная модель технологической цепочки процесса электронного документооборота технической документации

СП обычно используются для описания сложных процессов с динамической иерархической структурой. Они удобны для спецификации такого рода процессов из-за видимой и когерентной структуры. Ряд методов для анализа и проверки СП были представлены в [16].

Для исследования технологической цепочки процесса ЭДТД создается упрощенная ИМ, построенная посредством аппарата СП, что позволяет

провести анализ поведения системы при ее функционировании. Формализм СП дает возможность применять аналитические методы как для анализа исполнения, так и для верификации логических свойств исследуемых процессов, требует точных определений, исключая неопределенность и противоречия [12].

ИМ нашло широкое применение в различных направлениях развития ЖАТ [18–19]. Применение аппарата СП для моделирования бизнес-процессов рассмотрено в работе [20].

Для анализа процесса ЭДТД используем СП с временными ограничениями. 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. ВСП, в отличие от простых СП, расширяются путем введения множества времени задержек срабатывания переходов ($\tau = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_j\}$).

После расширения СП задается следующим образом:

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

В результате получаем временные СП с детерминированными задержками, которые являются одним из известных расширений базовых СП, используемых для моделирования систем и процессов, при анализе которых необходимо учитывать не только порядок выполнения действий, но также временные характеристики. Такие сети находят широкое применение при исследовании систем технологического и организационного управления. Поскольку, в соответствии с целью данной статьи, необходимо учитывать время выполнения технологических цепочек, целесообразно моделирование процессов ЭДТД с учетом качества ТД на устройства систем ЖАТ.

В [21] выделены технологические цепочки, соответствующие стадийности выполнения работ от их начала до завершения строительства и ввода систем ЖАТ в эксплуатацию. Под технологической цепочкой понимается функционально завершенная последовательность операций с комплектом ТД. На основе этих данных построена условная модель технологической цепочки ЭДТД (рис. 1). Условиями для данного процесса являются: а) разработка технических условий и технического задания на проектируемые объекты; б) наличие принципиальных и монтажных схем, спецификаций оборудования, изделий и материалов, объектных смет на строительство; в) отправка причастным службам ТД на проектируемый объект; г) наличие проектной документации по принципиальным и монтажным схемам; д) изготовление приборов и оборудования; е) строительство систем ЖАТ и проведение пусконаладочных работ. Событиями являются: 1) проектирование ТД; 2) проверка и исправление ошибок в ТД проектной организацией; 3) экспертиза ТД;

4) передача ТД заводу-изготовителю; 5) изготовление и строительство систем ЖАТ. Для определения предусловий и постусловий составим следующую таблицу.

Таблица событий, предусловий и постусловий модели технологической цепочки ЭДТД

Событие	Предусловия	Постусловия
1	а	б
2	б	в
3	в	г
4	г	д
5	д	е

Для описания рассматриваемой технологической цепочки процесса ЭДТД в ВСП условия моделируются позициями, события – переходами. При этом входы перехода являются предусловиями соответствующего события; выходы – постусловиями. Возникновение события равносильно запуску соответствующего перехода. Выполнение условий представляется маркером (фишкой) в позиции, соответствующей этому условию. Запуск перехода удаляет разрешающие фишки, представляющие выполнение предусловий, и образует новые фишки, которые представляют выполнение постусловий. Таким образом, модель процесса ЭДТД (рис. 1) в СП содержит 6 позиций и 5 переходов:

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

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

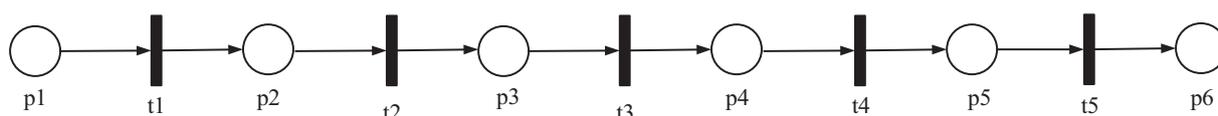


Рис. 1. Упрощенная модель сетей Петри процесса ЭДТД

Входные и выходные функции СП (см. рис. 1) имеют следующий вид:

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

4 Метод оценки временных параметров электронного документооборота технической документации на основе упрощенной модели сетей Петри

В [22] изложены принципы оценки качества ТД. Существенное влияние на все процессы жизненного цикла систем ЖАТ оказывает качество ТД. Под качеством понимается весь объем признаков и характеристик ТД, который относится к ее способности удовлетворять установленным потребностям.

Качество ТД $K_{ТД}$ рассматривается как внешнее и внутреннее. Под внешним качеством понимается способность системы ЖАТ, построенной на основе данной ТД, удовлетворять потребностям различных пользователей. Таким образом, учитывается, что качество системы ЖАТ как технической системы зависит от ТД. Внешнее $K_{ТД}$ определяется для каждого пользователя и для разных пользователей, показатели качества могут различаться, причем показатели внешнего качества обеспечиваются показателями внутреннего. Требования к внутреннему качеству определяются внешним $K_{ТД}$. В большинстве случаев приоритетным является качество выполнения основных функций системы ЖАТ при допустимом $K_{ТД}$ для других пользователей (например, высококачественное выполнение перевозочного процесса при приемлемой стоимости эксплуатации системы).

Внутреннее $K_{ТД}$ представляет собой качество с точки зрения реализации технической системы и определяет эффективность и время проектирования, проверки и обработки ТД, количество ошибок и время их устранения в технической системе. Внутреннее качество ТД определяет критерии внешнего качества системы ЖАТ. Поэтому для достижения высоких показателей внешнего $K_{ТД}$ необходимо совершенствовать процессы ЭДТД для достижения высоких значений показателей внутреннего качества ТД систем ЖАТ.

Одним из основополагающих факторов при оценке влияния качества ТД на характеристики ЭДТД, в первую очередь временные, от которых существенно зависит эффективность процессов жизненного цикла систем ЖАТ, является создание ИМ ЭДТД как сложных систем массового обслуживания.

Сформулируем задачу моделирования как оценку времени выполнения технологической цепочки ЭДТД. Наличие фишек на определенных позициях будет означать существование задания или запроса на выполнение соответствующих операций технологической цепочки ЭДТД. Например, наличие условий появления на позиции p_1 фишки будет означать, что появился запрос на разработку технических заданий и технических условий на проектируемый объект. Срабатывание перехода происходит мгновенно при наличии определенных условий для технологической цепочки ЭДТД. Увеличение или уменьшение количества фишек на дополнительных позициях отражает соответственно повышение или снижение качества ТД. Таким образом, модель для оценки времени электронного документооборота с учетом качества ТД (рис. 2) в СП содержит 8 позиций и 7 переходов:

В исходном состоянии ИМ (рис. 3) все позиции имеют емкость, равную единице, за исключением позиции $p_1 = 100, p_2 = 100, p_3 = 8, p_4 = 100, p_7 = 7$. Переходы, изображенные черным прямоугольником, имеют мгновенное время срабатывания, остальные переходы имеют детерминированное время срабатывания, равное $T_5 = 6, T_6 = 3$. Все дуги в сети имеют емкость, равную единице, за исключением дуг: $P_7 \cup T_2 = 2, T_2 \cup P_3 = 4$.

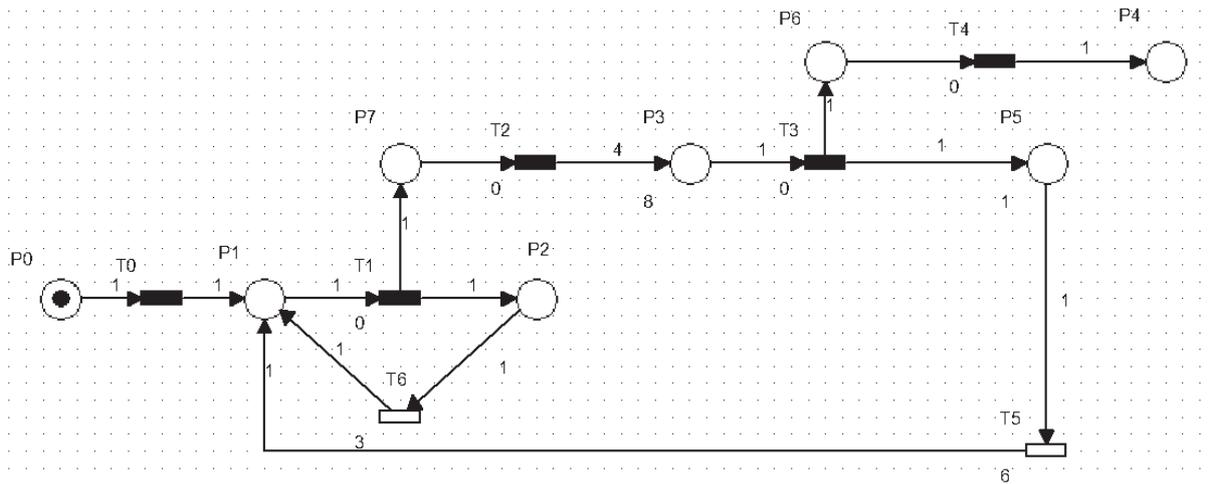


Рис. 3. Упрощенная имитационная модель ЭДТД (исходное состояние)

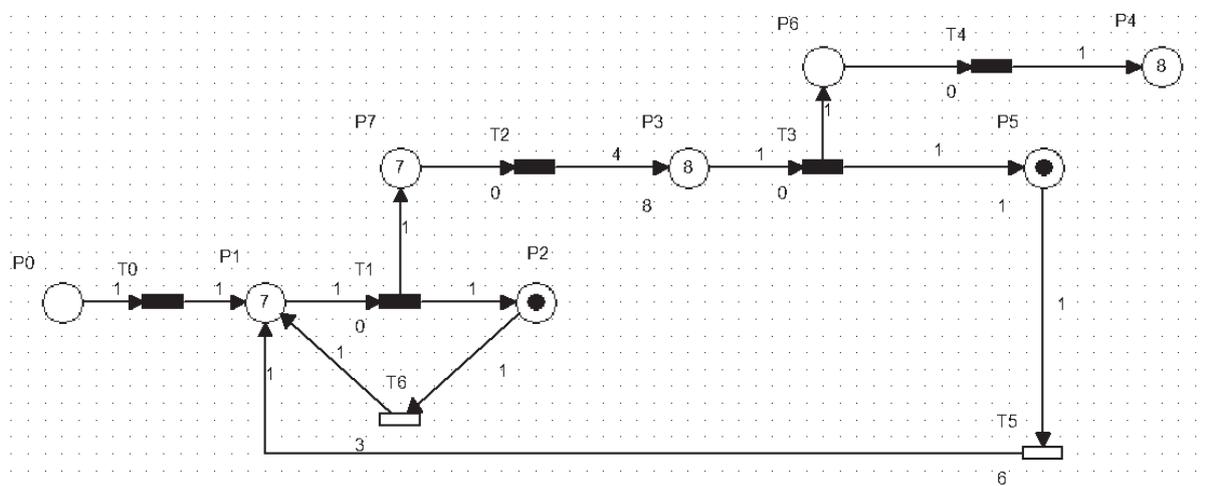


Рис. 4. Упрощенная имитационная модель ЭДТД (рабочее состояние)

В упрощенную ИМ дополнительно введено следующее условие: внутреннее качество ТД моделируется количеством фишек на определенных позициях ВСП, а именно: одна фишка на позиции соответствует 10% качества ТД, движение фишек же по сети характеризует передачу ТД от одной технологической цепочки к другой. Например, условием срабатывания перехода T_2 является наличие не менее семи фишек на позиции P_7 , что соответству-

ет (условно) качеству ТД, равному 70%, срабатывание перехода вызывает перемещение фишек на позицию P_3 , т. е. реализует передачу заключений экспертизы проектной документации по принципиальным и монтажным схемам. Далее переход T_3 ждет накопления на позиции P_3 не менее восьми фишек, что соответствует качеству ТД, равному 80%. Значения качества ТД 70 и 80% имитируются циклической работой перехода T_6 с учетом выполнения условий P_1 и P_2 , а также временных параметров срабатывания детерминированных переходов T_2 , T_6 и T_1 , т. е. проверки и исправления ошибок в ТД проектной организацией (рис. 4). Таким образом, после выполнения вышеуказанных условий ТД передается заводу-изготовителю и далее по технологической цепочке.

5 Области использования сетей Петри при моделировании процессов реализации технологических цепочек электронного документооборота технической документации

Предложенные модели СП технологической цепочки ЭДТД исследовались на базе программного средства HPSim. Программа позволяет реализовывать как стохастические СП, так и СП с учетом дискретного времени. Размер и сложность развитой СП ограничены только возможностями используемого компьютера. Программа написана на Visual C++, предполагает возможность визуального программирования и поддерживает классические СП, распространяется в соответствии с лицензией GNU General Public License [24–25]. Фактическое моделирование визуализируется как символическая мультипликация. Модель может быть запущена как на единственный шаг, так и на полный прогон. Имеется возможность ускоренного течения модельного времени.

Экспериментальные исследования процесса технологических цепочек ЭДТД при помощи разработанных упрощенных моделей на базе программного средства HPSim позволяют сделать следующие выводы.

1. При ИМ требуется многократное повторение опытов в соответствии с планом эксперимента. На базе существующего программного обеспечения возможно отредактировать и моделировать проект с несколькими сетями, в каждой из которых может быть до 1000 объектов, что существенно увеличивает возможности проведения экспериментов с большим количеством опытов.

2. Аппарат СП позволяет решать задачи определения причинно-следственных связей и структурирования моделей. Оценка количественных характеристик технологических цепочек ЭДТД при этом, как правило, остается довольно сложной. Поэтому модели, разработанные на базе аппарата СП, целесообразно использовать для решения специфических задач при ЭДТД.

3. Для оценки временных параметров на базе моделей СП необходимы статистические данные о длительности этапов используемых в модели технологических цепочек ЭДТД, которые являются специфическими и не всегда поддающимися оценке.

4. Для оценки качества ТД необходимы значения вероятностей перехода на соответствующие позиции. В противном случае, в условиях невозможности определения аналитическим путем вероятностных параметров, результаты ИМ технологических цепочек ЭДТД будут некорректными.

5. Модели, построенные при помощи методологии СП, наглядно отображают процесс моделирования, что облегчает процесс отладки и верификации ИМ.

Заключение

СП позволяют решать задачи определения причинно-следственных связей и структурирования процессов ЭДТД. Детерминированность процесса затрудняет возможность получения достоверных данных, поскольку обработка ТД во многих случаях связана с вероятностью. Модели ВСП технологических цепочек ЭДТД наглядно отображают моделируемый процесс, что существенно облегчает разработку и отладку моделей ЭДТД. Аппарат СП позволяет решать задачи определения причинно-следственных связей и структурирования моделей. Оценка количественных характеристик технологических цепочек ЭДТД при этом, как правило, остается довольно сложной, так как воздействующих на ЭДТД факторов очень много. Поэтому 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 определению взаимосвязей структуры технологических цепочек ЭДТД, оценки качества ТД путем определений временных параметров срабатываний переходов и движения фишек, верификации и валидации ИМ ЭДТД. Упрощенные модели СП технологической цепочки ЭДТД исследовались на базе программного средства HPSim. Программное средство HPSim позволяет наглядно отображать процессы моделирования, что облегчает отладку и верификацию имитационных моделей. Таким образом, в данной работе предложен новый метод описания общей формализованной схемы технологических цепочек ЭДТД. Обоснован выбор аппарата СП и представлена условная модель процессов ЭДТД верхнего уровня иерархии.

Выполнена формализация упрощенной технологической цепочки ЭДТД, показано использование возможностей моделирования с применением ВСП с детерминированными задержками на срабатывания переходов. Предложены возможные варианты использования различных расширений классических (базовых) СП. В результате исследования выявлено, что упрощенная модель ЭДТД с детерминированными задержками проще анализируется, но на прак-

тике такая модель имеет большие ограничения, так как логические условия срабатывания и время срабатывания переходов в реальных системах обычно варьируются. В связи с выявленными недостатками в дальнейших исследованиях предполагается использование иерархических временных цветных СП на базе обобщенной формализованной схемы ЭДТД с учетом иерархической структуры процессов.

Таким образом, следующими этапами выполнения работ по синтезу моделей и применению ИМ ЭДТД являются: статистический анализ выходных данных, полученных с использованием ИМ на основе иерархических временных цветных СП; определение вероятностных законов распределения случайных величин для моделирования срабатывания переходов СП; сравнительный анализ выходных данных при срабатывании переходов СП, которые подчиняются определенным законам распределения случайных величин; планирование и проведение серий имитационных экспериментов для оценки выбранных показателей 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 // Известия ПГУПС. – 2007. – Вып. 1. – 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 // Автоматики 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. Устимов К. О. Автоматизация построения иерархической имитационной модели бизнес-процессов в виде раскрашенных сетей Петри на основе модели IDEF0 / К. О. Устимов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – С. 90–94.
5. Устимов К. О. Алгоритм преобразования IDEF0 модели в раскрашенную сеть Петри / К. О. Устимов, Н. В. Федоров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – С. 321–327.
6. Kulagin V.P. Tensor Methods of Designing Computer System Structures / V.P. Kulagin // Automatic Control and Computer Sciences. – N. Y., 1989. – P. 55–61.
7. 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.
8. 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 Trans. on Systems, Man and Cybernetics: Systems. – 2013. – Vol. 43. – N 4, July. – Pp. 932–940.

9. Buchina N. The tool for modeling of wireless sensor networks with nested Petri nets / N. Buchina, L. Dworzanski // 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.
10. 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. – N 1. – Pp. 59–71.
11. Shen Q. Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model / Q. Shen, J. Qiu, G. Liu, K. Li // Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability. – 2016. – Vol. 18. – N 2. – Pp. 210–217.
12. 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.
13. Зеленский В. А. Моделирование технологических процессов с помощью сетей Петри / В. А. Зеленский, В. П. Коннов, А. И. Щодро // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». – Самара : Изд-во СГАУ, 2012. – С. 286–290.
14. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон ; пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 264 с.
15. Мурата Т. Сети Петри : свойства, анализ и приложения / Т. Мурата // Тр. ТИИИЭР ; пер. с англ. – 1989. – Т. 77. – № 4. – С. 41–79.
16. Frumin D. NPNtool : Modelling and Analysis Toolset for Nested Petri Nets. In Proceedings of the 7th Spring / D. Frumin and L. Dworzanski // Summer Young Researchers Colloquium on Software Engineering. – 2013. – Pp. 9–14.
17. Вил ван дер Ааласт. Управление потоками работ : модели и системы / Ван дер Ааласт Вил, Ван Хей Кейс ; пер. с англ. В. А. Башкина, И. А. Ломазовой. – М. : Физматлит, 2007. – 316 с.
18. Василенко М. Н. Применение комплекса базовых имитационных моделей для решения задач обеспечения надежности и безопасности систем железнодорожного транспорта / М. Н. Василенко, Д. С. Марков, Н. И. Рубинштейн // Материалы Всесоюзной конференции «Моделирование систем и процессов управления на транспорте». – М. : ВНИИЖТ, 1991. – С. 76–79.
19. Василенко М. Н. Имитационное моделирование АСУ технологическими процессами на железнодорожном транспорте / М. Н. Василенко, А. В. Гриненко, Д. С. Марков // Материалы научно-технической конференции «Пути повышения эффективности использования подвижного состава» – Гомель : БелИИЖТ, 1983. – С. 52–53.
20. Li X. A survey of research issues and key technology for business process management / X. Li, Y. Y. Du // J. Shandong Univ. Sci. Technol. – 2015. – Vol. 34. – N 1. – Pp. 22–28.
21. Зайцев Д. А. Уравнение состояний и эквивалентные преобразования временных сетей Петри / Д. А. Зайцев, А. И. Слепцов // Кибернетика и системный анализ. – 1997. – № 5. – С. 59–76.
22. Булавский П. Е. Метод оценки времени на 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. тр. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб., 2014. – С. 64–69.
23. Булавский П. Е. Оценка качества технической документации на системы ЖАТ / П. Е. Булавский // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 8. – С. 37–39.
 24. Ходаковский В. А. Моделирование технических задач сетями Петри в среде HPSim / В. А. Ходаковский // Актуальные вопросы развития систем железнодорожной автоматики и телемеханики : сб. науч. тр. ; под ред. Вл. В. Сапожникова. – СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2013. – С. 41–51.
 25. Зелинский В. А. Имитационное моделирование производственных процессов с помощью сетей Петри / В. А. Зелинский, В. П. Кононов, А. И. Щодро // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. – 2012. – № 7. – С. 137–142.

*Peter E. Bulavsky,
Oleg K. Vaisov*

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

**Formalization of electronic processes
documentation of the technical documentation
with the network of Petri networks**

Petri nets are a promising methodology for modeling various systems and processes, especially business processes, in particular, document flow of technical documentation. The article considers a new methodology for modeling the processes of electronic document management, taking into account the quality of technical documentation using the methodology of temporary Petri nets with deterministic delays in triggering transitions. The description of the simplified model of electronic document circulation of technical documentation for devices of railway automation and telemechanics based on the apparatus of Petri nets is given. Using the developed simplified DCTD model, a method for assessing the quality of technical documentation based on the time parameters of the DCTD process is proposed. The possibility of using the obtained Petri net model as an alternative for performing the verification and validation procedures for the EDDD simulation model is shown.

requirements to models and methods of electronic document circulation of technical documentation; classical Petri nets; deterministic temporary Petri nets, quality of technical documentation; marking; positions; transitions; ribs; developments; conditions; input and output functions

References

1. Vasilenko M. N., Denisov B. P., Bulavsky P. E., Trokhov V. G. (2007). Organization of electronic document management in the design of automation and telemechanics systems [Organizatsiya elektronnoy dokumentatsii pri proyektirovaniy sistem avtomatiki i telemekhaniki]. Proceedings of St. Petersburg University of Communications [Izvestiya Peterburgskogo universiteta puty soobshcheniya]. – St. Peterburg, issue 4. – 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 elektronnoy dokumentatsii]. Automation of Transport [Avtomatika na trasporte], issue 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. 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-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. – Pp. 90–94.
5. Ustimov K. O., Fedorov N. V. (2014). Algorithm for converting the IDEF0 model into a colored network Petri [Algoritm preobrazovaniya IDEF0 modeli v raskrashennuyu set' Petri]. Mountain information-analytical bulletin (scientific and technical journal) [Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)]. – Pp. 321–327.
6. Kulagin V. P. (1989). Tensor Methods of Designing Computer System Structures. Automatic Control and Computer Sciences. New York. – Pp. 55–61.
7. 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. – Pp. 19–35.
8. 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, N 4. – Pp. 932–940.
9. Buchina N., Dworzanski L. (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. – Pp. 15–18.
10. 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, vol. 61, issue 1. – Pp. 59–71.
11. Shen Q., Qiu J., Liu G., Li K. (2016). Intermittent fault's parameter framework and stochastic petri net based formalization model. Eksploatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, vol. 18, N 2. – Pp. 210–217.

12. Ermakova V.O., Lomazova I.A. (2016). Translation of embedded Petri nets for verification of sweeps [Translyatsiya vlozhennykh setey Petri dlya verifikatsii razvertok]. Proceedings of ISP RAS (Trudy ISP RAN), vol. 28, issue 4. – Pp. 115–136.
13. Zelensky V.A., Konnov V. P., Shchodro A. I. (2012). Modeling of technological processes with the help of Petri [Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov s pomoshch'yu setey Petr]. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Radioelectronics and Telecommunications» [Trudy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy». Samara, Publishing House of SGAU. – Pp. 286–290.
14. Peterson J. (1984). Theory of Petri nets and modeling of systems: Per. with English [Teoriya setey Petri i modelirovaniye sistem: Per. s angl]. Moscow, The World (Mir). – 264 p.
15. Murata T. (1989). Petri nets: properties, analysis and applications [Seti Petri: svoystva, analiz i prilozheniya], issue 4. – Pp. 41–79.
16. Frumin D., Dworzanski L. (2013). NPNtool: Modeling and Analysis Toolset for Nested Petri Nets. In Proceedings of the 7th Spring/Summer Young Researchers Colloquium on Software Engineering. – Pp. 9–14.
17. Wil van der Aalast, Case van Hey, Bashkin V.A., Lomazova I.A. (2007). Workflow management: models and systems; trans. with English. Moscow, Fizmatlit. – 316 p.
18. Vasilenko M. N., Markov D. S., Rubinshtein N.I. (1991). Application of a complex of basic simulation models for solving problems of ensuring the reliability and safety of railway transport systems [Primeneniye kompleksa bazovykh imitatsionnykh modeley dlya resheniya zadach obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem zheleznodorozhnogo transporta]. Proceedings of the All-Union Conf. «Modeling of transport management systems and processes» (Materialy Vsesoyuzn.konf. «Modelirovaniye sistem i protsessov upravleniya na transporte). Moscow, VNIIZhT. – Pp. 76–79.
19. Vasilenko M. N., Grinenko A. V., Markov D. S. (1983). Simulation modeling of automated process control systems by technological processes in railway transport [Imitatsionnoye modelirovaniye ASU tekhnologicheskimi protsessami na zheleznodorozhnom transporte]. Materials of scientific and technical. Conf. «Ways to increase the efficiency of the use of rolling stock» [Materialy nauchno-tekhn. konf. «Puti povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya podvizhnogo sostava»]. – Gomel, BelIIT. – Pp. 52–53.
20. X. Li, Du Y.Y. (2015). A survey of research issues and key technology for business process management. J. Shandong Univ. Sci. Technol., vol. 34, issue 1. – Pp. 22–28.
21. Zaitsev D.A., Sleptsov A. I. (1997). Equation of states and equivalent transformations of time networks Petri [Uravneniye sostoyaniy i ekvivalentnyye preobrazovaniya vremennykh setey Petri]. Cybernetics and system analysis [Kibernetika i sistemnyy analiz], issue 5. – Pp. 59–76.
22. Bulavsky P.E., Markov D. S. (2014). A method for estimating time for the execution of electronic document flow of technical documentation [Metod otsenki vremeni

- na vypolneniya protsessov elektronnoy dokumentooborota tekhnicheskoy dokumentatsii]. In the collection: The development of the element base and the improvement of methods for constructing devices for railway automation and telemechanics. A collection of scientific works. Ed. Vl. V. Sapozhnikov. St. Petersburg [V sbornike: Razvitiye elementnoy bazy i sovershenstvovaniye metodov postroyeniya ustroystv zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki sbornik nauchnykh trudov Pod redaktsiyey Vl. V. Sapozhnikova. Sankt-Peterburg]. – Pp. 64–69.
23. Bulavsky P.E. (2011). Evaluation of the quality of technical documentation for the systems of the RSAT [Otsenka kachestva tekhnicheskoy dokumentatsii na sistemy ZJAT]. Automation, communication, informatics [Avtomatika, svyaz, informatika], issue 8. – Pp. 37–39.
24. Khodakovsky V.A. (2013). Modeling of technical systems by petri nets in HPSim environment [Modelirovaniye tekhnicheskikh sistem setyami petri v srede HPSim]. Automation of Transport [Avtomatiki na transporte], issue 2. – Pp. 41–51.
25. Zelinsky V.A., Kononov V.P., Shchodro A.I. (2012). Simulation modeling of production processes using Petri nets [Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh protsessov s pomoshch'yu setey Petri]. Bulletin of the Samara State Aerospace University. academician S.P. Korolev [Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolova], issue 7. – Pp. 137–142.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Д. С. Марковым
Поступила в редакцию 24.03.2018, принята к публикации 17.05.2018*

БУЛАВСКИЙ Петр Евгеньевич – доктор технических наук, доцент 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., Вайсов О. К., 2018