

МЕТОДЫ ФОРМАЛЬНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА БАЗЕ РАСШИРЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

А. Г. Волошко¹, О. С. Крюков²

Тульский государственный университет, пр. Ленина, 92, 300012, г. Тула, Россия, ¹atroshina@mail.ru, ²ol_kryukov97@mail.ru

Рассматриваются методы моделирования и формальной верификации полученных моделей производственных процессов. В качестве модели производственного процесса используются расширенные сети Петри с семантическими связями. Приводятся правила эквивалентных преобразований сетей и правила сравнения моделей.

Ключевые слова: автоматизация, производственный процесс, моделирование, верификация, расширенные сети Петри.

METHODS OF FORMAL VERIFICATION OF PRODUCTION PROCESS MODELS BASED ON EXTENDED PETRI NETS

A. G. Voloshko¹, O. S. Kryukov²

Tula State University, ave. Lenin, 92, 300012, Tula, Russia, ¹atroshina@mail.ru, ²ol_kryukov97@mail.ru

Methods of modeling and formal verification of the obtained models of production processes are considered. Extended Petri nets with semantic relations are used as a model of the production process. Rules for equivalent transformations of net and rules for comparing models are given.

Keywords: automation, production process, modeling, verification, extended Petri nets.

Современные информационные технологии позволяют все больше автоматизировать различные процессы, выполнять их автоматизированный мониторинг, анализ и предлагать возможность для автоматизации моделирования. Модели производственных процессов значительно различаются в зависимости от цели их построения. Так, могут формироваться аналитические модели, многоагентные, функциональные, сетевые и другие. В нашем исследовании ключевым вопросом является рациональность организации процессов с точки зрения оптимальности потоков информации и материалов. Поэтому наиболее подходящим является использование имитационных моделей, а именно расширение теории сетей Петри [1].

Одним из ключевых вопросов моделирования является верификация модели, то есть проверка ее истинности и адекватности [2]. В зависимости от модели, описывающей производственный процесс, могут быть применены различные методы верификации. Так, существует ряд методов верификации для функциональных моделей [3], для вложенных сетей Петри [4] и др. Однако, учитывая особенности моделей расширенных сетей Петри с семантическими связями, необходима разработка собственных методов.

Расширенной сетью Петри с семантическими связями (РСПСС) является иерархическая раскрашенная временная сеть Петри с семантическими связями, которая представляет собой структурно-параметрическую модель, заданную множеством $\Psi = \{P, M\}$, где $P = \{A, Z^C, Z^S, Tr\}$ – множество, описывающее структуру трехдольного ориентированного графа, представляющего собой расширенную сеть Петри, A – конечное множество позиций, Z^C – конечное множество переходов по управлению, Z^S – конечное множество переходов по семантическим связям, Tr – множество дуг сети; $M = \{h^C(t), h^S(t), \Lambda^C, \Lambda^S\}$ – параметры, накладываемые на структуру P , и определяющие временные и логические характеристики СПДСС; $h^C(t)$ и $h^S(t)$ – вектора времени задержки управляющей и семантической составляющей фишки в позиции перед прохождением соответствующего перехода; t – время; Λ^C и Λ^S – векторы логических условий, определяющих возможность срабатывания соответствующего перехода. В такой сети позиции представляют выполняемые действия, переход по управлению характеризует последовательность действий в текущей организации процесса, а переходы по семантическим связям – логику прохождения процесса, то есть необходимость завершения одного действия для выполнения другого и, соответственно, передачу информации и материальных объектов на следующий этап обработки. РСПСС может содержать раскраску для определения исполнителей и средств выполнения действий.

Изначально сеть строится на основе наблюдения и анализа процесса. Верификация изначальной модели может выполняться несколькими способами: моделированием различных ситуаций и проверкой их на соответствие ожидаемым результатам, проверкой состояния модели после завершения процесса или определенных этапов процесса. Однако в ходе оптимизации и реорганизации модель процесса может быть перестроена и соответствовать уже не реальному процессу, а желаемому. Верификация таких моделей может быть более сложной, так как, допустив ошибки в модели, можно получить результаты, соответствующие ожиданиям от модели, но не реализуемые в действительности. Решить вопрос верификации можно введя понятие эквивалентности расширенных сетей Петри с семантическими связями.

Две расширенные сети Петри с семантическими связями являются эквивалентными, если у них совпадают множества позиций и переходов по семантическим связям, и для каждого перехода по семантическим связям совпадают входные и выходные функции, а также сохраняются некоторые отношения предшествования по управлению для особых структур процесса (например, выбор пути реализации процесса). Эквивалентными

преобразованиями являются такие перестроения РСПСС, которые переводят исходную сеть Π в эквивалентную ей сеть Π' . Приведем основные эквивалентные преобразования СПДСС:

1. Правило перестановки позиций местами. Если в РСПСС имеется две позиции a_i и a_j , соединенные переходом по управлению, но не имеющие прямой или опосредованной связи по семантике, то эти позиции можно поменять местами, не меняя логики развития процесса.

2. Правило разделения позиций. Если в РСПСС имеется две позиции a_i и a_j , одна из которых a_i является входной функцией перехода по управлению, a_j выходной функцией этого же перехода, но a_i и a_j не имеют прямой или опосредованной связи по семантике, и имеется позиция a_k , которая не является предшественником a_i и не является последователем a_j по семантическим связям, при этом все три позиции в случае наличия вариантов развития процесса принадлежат одному и тому же варианту, то позиция a_k может быть перемещена в РСПСС между позициями a_i и a_j .

3. Правило минимизации расстояния между семантически связанными позициями. В РСПСС для любой позиции a_i , из которой выходит минимум одна семантическая связь, всегда можно построить такую эквивалентную сеть, в которой между позицией a_i и минимум одной из подмножества позиций, соединенных с ней семантической связью, будет не более одного перехода по управлению.

4. Правило формирования перехода fork. Если в РСПСС для любой позиции a_i , из которой выходит минимум две семантические связи в позиции a_j, a_k , причем для каждой из них данная позиция является единственной, при этом все позиции в случае наличия вариантов развития процесса принадлежат одному и тому же варианту, то можно построить такую эквивалентную сеть, в которой между позицией a_i и позициями a_j, a_k будет расположен переход по управлению типа fork.

5. Правило формирования перехода join. Если в РСПСС имеются две и более входных позиций a_i, a_j перехода по семантическим связям, представленные в условии срабатывания перехода отношением конъюнкции, которые семантически несовместимы и одна выходная позиция данного перехода a_k , то можно построить такую эквивалентную сеть, в которой позиции a_i, a_j связаны с позицией a_k переходом по управлению типа join.

6. Правило формирования перехода synchro. Если в РСПСС имеются две и более входных позиций a_i, a_j перехода по семантическим связям с выходной позицией a_k , представленные в условии срабатывания перехода отношением конъюнкции, которые также являются входными позициями другого перехода по семантическим связям с выходной позицией a_l , то можно построить такую эквивалентную сеть, в которой позиции a_i, a_j и позиции a_k, a_l связаны переходом synchro.

Таким образом, верификация модели заключается в доказательстве эквивалентности исследуемой модели и модели, которая уже была проверена. Можно сформулировать следующее достаточное условие: если имеется адекватная модель процесса Π_1 , то модель реорганизованного процесса Π_2 также будет адекватна, если существуют такие эквивалентные преобразования сети Π_1 , которые переведут ее в сеть Π_2 .

Следует отметить, что, помимо перечисленных выше эквивалентных преобразований, могут потребоваться дополнительные неэквивалентные преобразования РСПСС. Это обусловлено возможностью оптимизации цифровой среды предприятия. При таких преобразованиях возможно сокращение числа позиций сети за счет реализации части действий автоматизированными системами, уменьшение числа переходов по семантическим связям и формирование нового перехода по семантическим связям s-share, отображающего взаимодействия пользователей с автоматизированными системами. Для таких систем достаточное условие адекватности моделей может быть сформулировано следующим образом: для адекватности модели все выходные позиции перехода s-share копируют выходные позиции удаленных переходов по семантическим связям, а входные позиции перехода s-share могут как копировать входные позиции удаленных переходов, так и представлять собой одну или несколько позиций, представляющих работу с автоматизированными системами.

Предложенный в статье подход позволяет автоматически формировать корректные модели и проводить верификацию новых моделей на основе имеющейся адекватной модели базового процесса до его модификации.

Библиографический список

1. Волошко А. Г., Ивутин А. Н., Крюков О. С. Методы моделирования и анализа производственных процессов для разработки стратегии модернизации предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 12. С. 36–44.
2. Общеэкономический и экономико-математический объяснительный словарь. Словарь Лопатникова. URL: <https://lopatnikov.pro/biograficheskoe/> (дата обращения: 01.10.2021).
3. Бурляева Е. В. и др. Алгоритмы и программа верификации функциональных моделей // Программные продукты и системы. 2021. Т. 34. № 2. С. 1–9.
4. Дворянский Л. В., Ломазова И. А. Имитационное моделирование и верификация вложенных сетей Петри с использованием CPNTools // Моделирование и анализ информационных систем. 2015. Т. 19. № 5. С. 115–130.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-1160.2020.9.