

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Программная реализация методов моделирования процессов цифрового документооборота	5
2 Технологическая часть	5
2.1 Реализация алгоритма моделирования с помощью sTPN	5
2.2 Сопоставление BPMN 2.0 и сетей Петри	5
2.3 Реализация алгоритма квантового моделирования	6
2.3.1 Выбор и обоснование средств разработки	6
2.3.2 Листинги кода	7
3 Исследование разработанных методов моделирования процессов цифрового документооборота	9
4 Исследовательская часть	9
4.1 Моделирование с помощью sTPN	9
4.2 Квантовое моделирование	12
4.3 Вывод	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	18
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	19

ВВЕДЕНИЕ

Развитие области электронного документооборота (ЭДО) является одной из приоритетных и актуальных задач цифровизации государственных и частных секторов, об этом свидетельствует ежегодно увеличивающийся на 15% объём электронного документооборота[1].

Системы электронного документооборота (СЭД) должны отвечать высоким стандартам в области безопасности, эффективности и надёжности, где критическим показателем является своевременное исполнение процессов[1]. В связи с этим основное внимание в области ЭДО уделяется контролю процессов управления, нежели управлению потоком данных[1]. СЭД должна регулярно проходить проверки на соответствие стандартам и требованиям проектирования соответствующих систем[1].

Целью данной работы является анализ существующих методов моделирования процессов цифрового документооборота, включая сети Петри и квантовое моделирование, а также разработка системы, способной проводить данное моделирование. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать и проклассифицировать методы моделирования процессов цифрового документооборота с использованием различных сетей Петри;
- проанализировать и проклассифицировать методы квантового моделирования процессов цифрового документооборота;
- сформулировать общие требования к разрабатываемой системе;
- разработать алгоритмы, позволяющие промоделировать процессы цифрового документооборота;
- промоделировать процессы цифрового документооборота с использованием разработанного программного обеспечения;
- проанализировать полученные результаты.

1 Программная реализация методов моделирования процессов цифрового документооборота

2 Технологическая часть

2.1 Реализация алгоритма моделирования с помощью sTPN

Для построения сети Петри и дальнейшей обработки результатов моделирования было выбрано программное обеспечение OrisTool[7]. Данное ПО обладает всеми необходимыми для решения поставленной задачи функциями:

- возможность построения стохастической сети Петри;
- возможность проведения моделирования сети Петри;
- наличие прямого и обратного переходного анализа;
- визуализация полученных данных.

2.2 Сопоставление BPMN 2.0 и сетей Петри

Для корректного построения модели необходимо установить связь между элементами BPMN 2.0 с сетями Петри. Сопоставление представлено на рисунке 1.

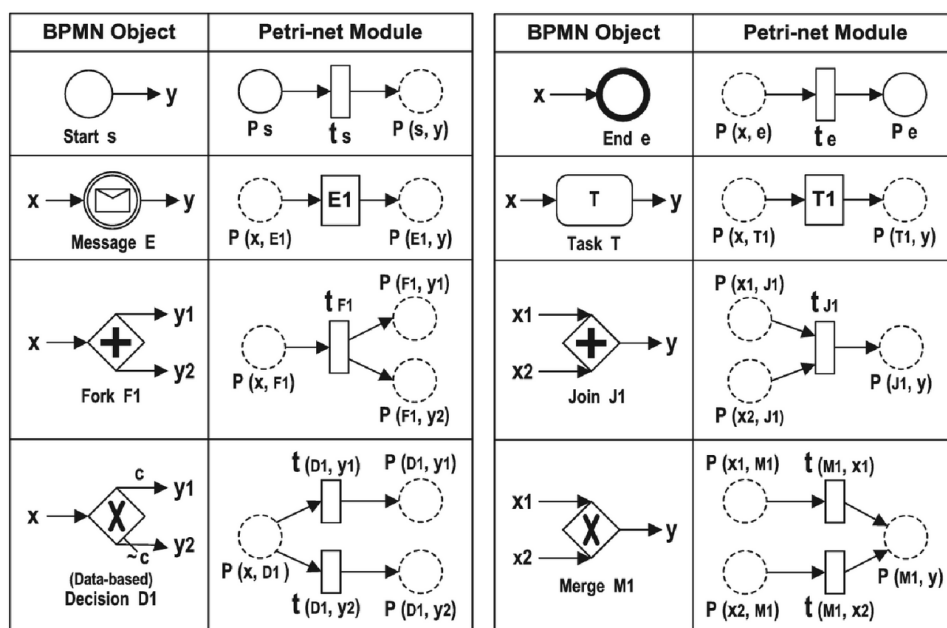


Рисунок 1 – Сопоставление BPMN 2.0 и сетей Петри

2.3 Реализация алгоритма квантового моделирования

2.3.1 Выбор и обоснование средств разработки

В качестве языка программирования был выбран логический язык SWI-Prolog[8] – инструмент для работы с логическим программированием, предназначенный для поиска заданного решения. Для решения поставленной задачи данный язык программирования обладает следующими достоинствами:

- декларативный подход: в отличие от императивных языков программирования, SWI-Prolog позволяет описывать задачи и решения в декларативной форме – что должно быть сделано, а не как именно это нужно выполнить;
- управление перебором: эффективное управление процессом перебора возможных решений (англ. backtracking) позволяет оптимально находить все возможные решения для заданной проблемы, автоматически пробуя различные варианты и отсекая неверные пути;
- встроенные предикаты: SWI-Prolog предлагает обширную библиотеку встроенных предикатов для различных математических операций, что упрощает реализацию многих стандартных математических функций и операций;
- работа с символическими выражениями: возможность обрабатывать и вычислять символические выражения, позволяет отказаться от полного числового ввода, что полезно для математических формул, требующих символического вывода, а не только численного решения;
- интеграция с другими языками и системами: данный язык возможно интегрировать с другими языками программирования, такими как Python или C, что позволяет использовать SWI-Prolog для логических и символических вычислений в рамках более крупных систем;
- отладка и разработка: SWI-Prolog предлагает различные инструменты для отладки и трассировки программ, что помогает в разработке слож-

ных алгоритмов и облегчает поиск и исправление ошибок.

2.3.2 Листинги кода

Реализация программы для подсчёта вероятности прохождения документа из начального статуса в финальный и поиска данного статусного пути, без учёта базы знаний, представлена в листинге 1.

Листинг 1: Реализация поиска пути и вероятности

```
1 transition_probability(EFT, LFT, Probability) :-
2   Probability is (LFT - EFT) / LFT.
3
4 find_path(Start, End, Path, Probability, Steps) :-
5   travel(Start, End, [Start], 1, 0, RevPath, Probability, Steps),
6   reverse(RevPath, Path).
7
8 travel(Start, End, Visited, CurrentProb, CurrentSteps, [End|Visited],
9       FinalProb, FinalSteps) :-
10  transition(Start, End, EFT, LFT),
11  transition_probability(EFT, LFT, StepProb),
12  FinalProb is CurrentProb * StepProb,
13  FinalSteps is CurrentSteps + 1.
14
15 travel(Start, End, Visited, CurrentProb, CurrentSteps, Path, FinalProb,
16       FinalSteps) :-
17  transition(Start, Mid, EFT, LFT),
18  Mid \= End,
19  \+member(Mid, Visited),
20  transition_probability(EFT, LFT, StepProb),
21  NewProb is CurrentProb * StepProb,
22  NewSteps is CurrentSteps + 1,
23  travel(Mid, End, [Mid|Visited], NewProb, NewSteps, Path, FinalProb,
24       FinalSteps).
```

Реализация программы для нахождения вероятностного распределения представлена в листинге 2.

Листинг 2: Реализация построения вероятностного распределения

```
1  initial_distribution(["status1"-p1, "status2"-p2]).
2
3  update_distribution(Dist, NewDist) :-
4      findall(S-NewProb, (
5          member(S-, Dist),
6          findall(P, (
7              member(S1-P1, Dist),
8              transition(S1, S, EFT, LFT),
9              P is (EFT / LFT) * P1
10         ), Probs),
11          sum_list(Probs, TotalProb),
12          NewProb is TotalProb
13      ), TempDist),
14      normalize_distribution(TempDist, NewDist).
15
16  normalize_distribution(Dist, Normalized) :-
17      sum_list(Dist, Total, 0),
18      maplist(normalize_prob(Total), Dist, Normalized).
19
20  normalize_prob(Total, S-P, S-NormP) :- NormP is P / Total.
21
22  sum_list([], Total, Total).
23  sum_list([_P|T], Total, Acc) :- NewAcc is Acc + P, sum_list(T, Total,
24      NewAcc).
25
26  perform_steps(Dist, 0, [Dist]).
27  perform_steps(Dist, N, [Dist|Rest]) :-
28      N > 0,
29      update_distribution(Dist, NewDist),
30      M is N - 1,
31      perform_steps(NewDist, M, Rest).
32
33  print_numeric_results([]).
34  print_numeric_results([H|T]) :-
35      findall(Prob, member(_-Prob, H), Probs),
36      writeln(Probs),
37      print_numeric_results(T).
```

3 Исследование разработанных методов моделирования процессов цифрового документооборота

4 Исследовательская часть

В данном разделе будет исследован процесс утверждения темы. Модель бизнес-процесса представлена на рисунке 2.

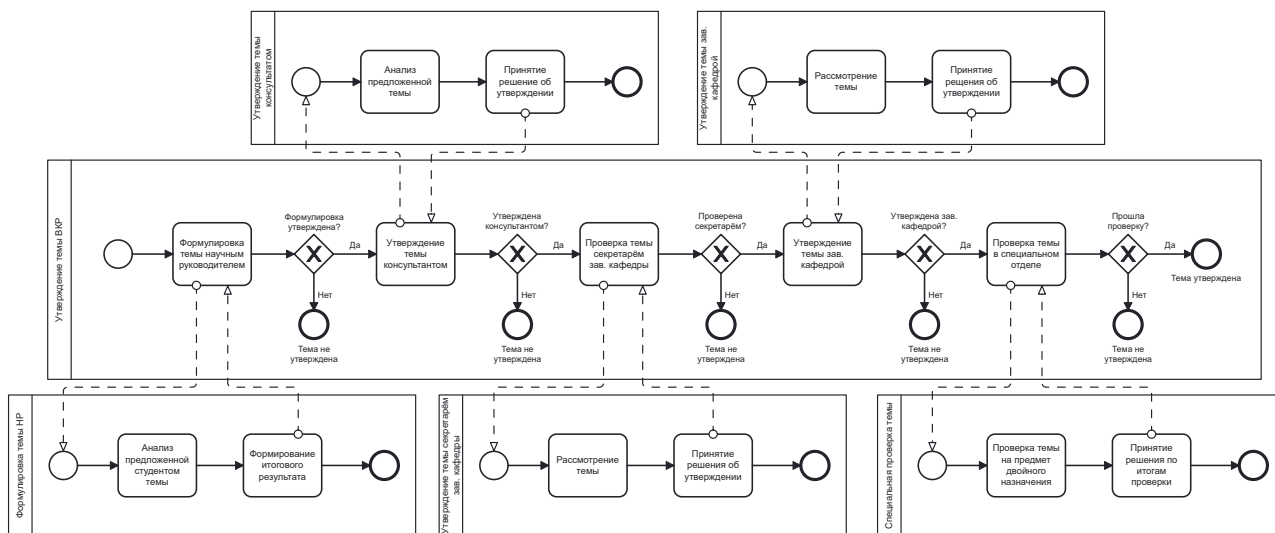


Рисунок 2 – Модель сети Петри

4.1 Моделирование с помощью sTPN

Построим соответствующую процессу стохастическую модель сети Петри для дальнейшего моделирования процесса. Итоговая модель сети Петри представлена на рисунке 3.

Прямой анализ переходных процессов[9] на временном отрезке в 22 временных единицы показал сходимость модели к 20 временным единицам. Результат прямого анализа переходных процессов представлен на рисунке 4.

Регенеративный анализ переходных процессов[10] на временном отрезке в 34 временные единицы с использованием переменной, отвечающей за полное выполнение цикла модели – Reward variable[11] подтвердил результаты прямого анализа. Результат регенеративного анализа переходных процессов представлен на рисунке 5.

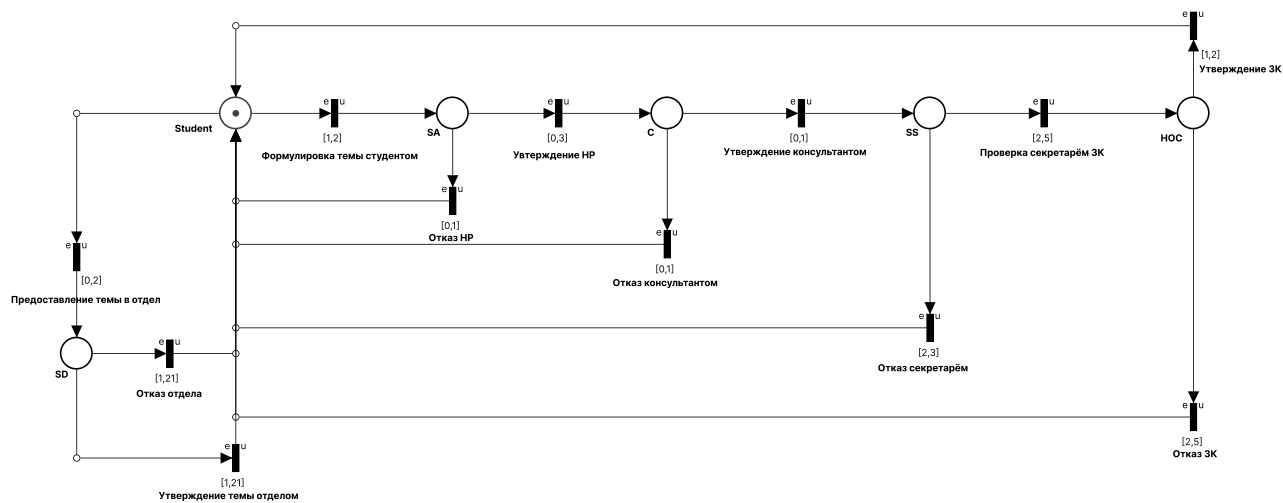


Рисунок 3 – Модель сети Петри

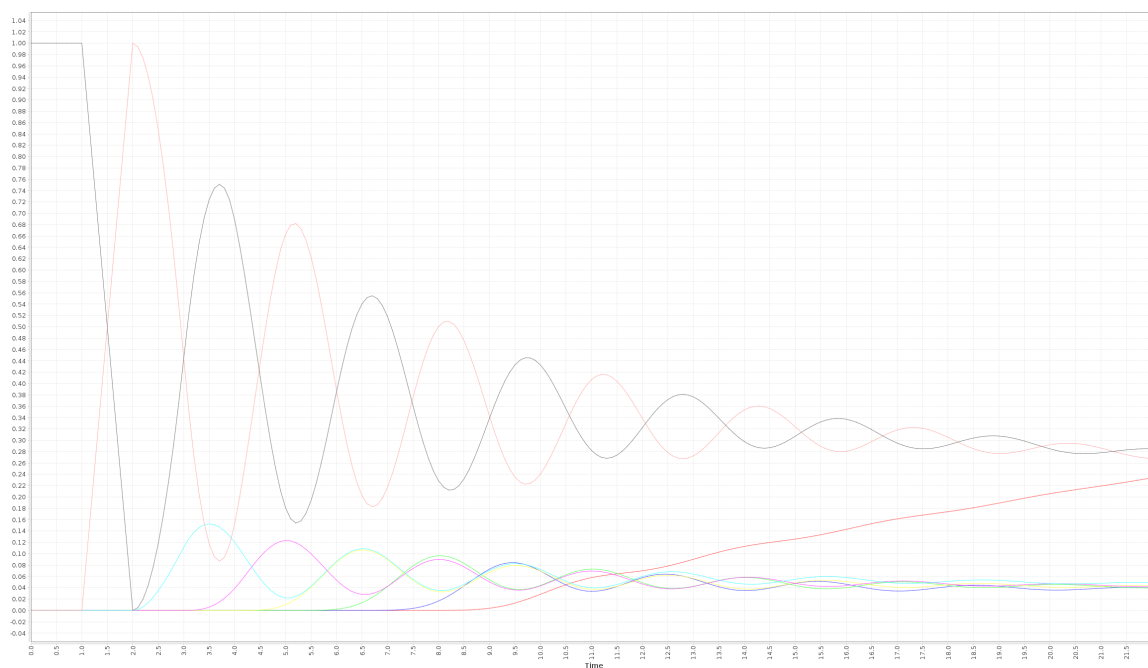


Рисунок 4 – Результат прямого анализа переходных процессов сети Петри

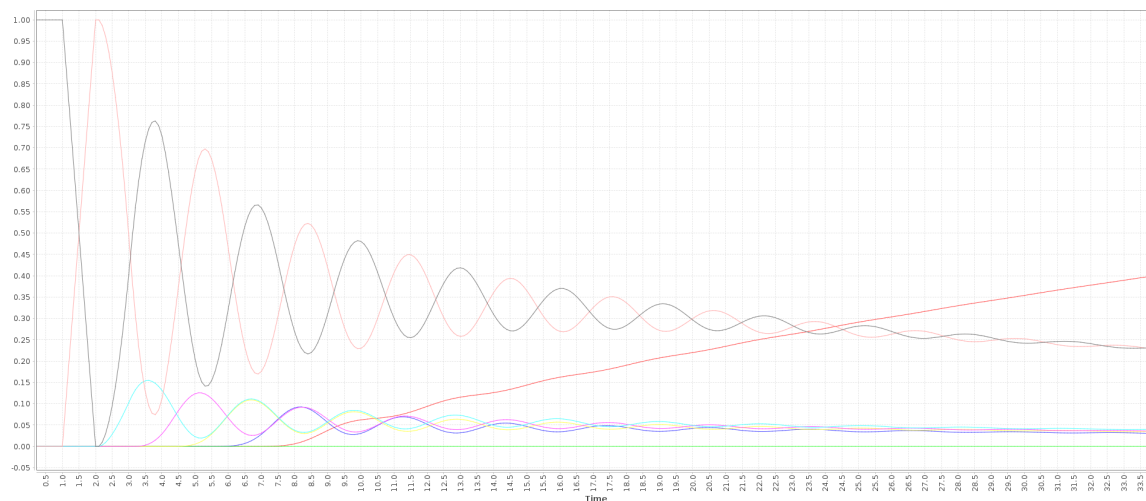


Рисунок 5 – Результат регенеративного анализа переходных процессов сети Петри

Результаты заключительного регенеративного анализа для установления отношения вероятности достижения успешного исхода событий от времени представлены на рисунке 6.

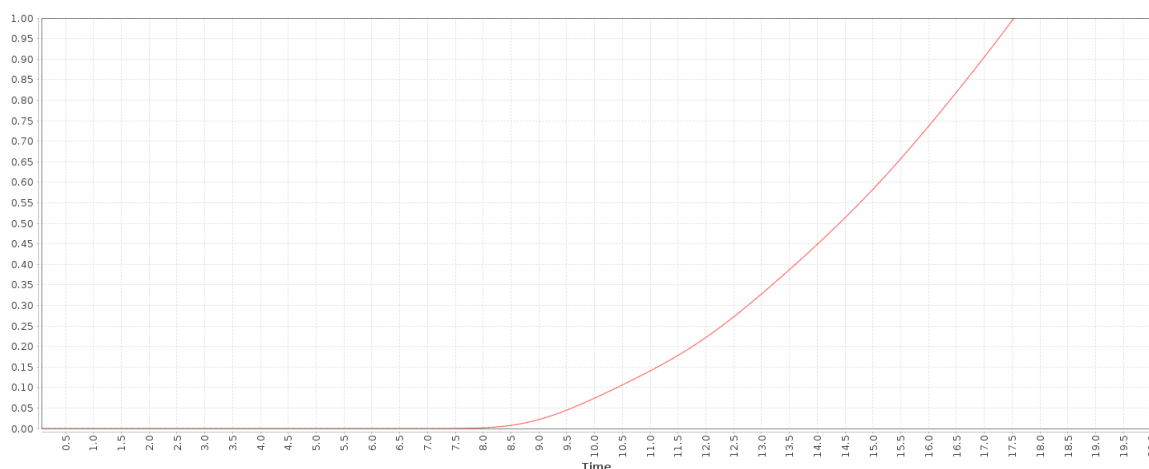


Рисунок 6 – Результат регенеративного анализа сети Петри с переменной

Исходя из полученных данных прямого и обратного анализов максимальное время на выполнение процесса может занять до 18 временных единиц. Совокупное время моделирования составило 72 часа.

4.2 Квантовое моделирование

Для расчёта необходимо заполнить базу знаний. В качестве стохастических переходов использовано аналогичное сетям Петри нормальное распределение с параметрами EFT (Expected Finish Time) и LFT (Latest Finish Time). База знаний представлена на рисунке 7.

```

transition("начало", "утверждение - НР", 1, 2).
transition("утверждение - НР", "начало", 1, 2).
transition("утверждение - НР", "утверждение - К", 1, 4).
transition("утверждение - К", "начало", 1, 2).
transition("утверждение - К", "проверка секретарём", 1, 2).
transition("проверка секретарём", "начало", 1, 5).
transition("проверка секретарём", "утверждение - ЗК", 1, 2).
transition("утверждение - ЗК", "начало", 1, 8).
transition("утверждение - ЗК", "рассмотрение в отделе", 1, 2).
transition("рассмотрение в отделе", "начало", 1, 2).
transition("рассмотрение в отделе", "утверждён", 1, 2).

```

Рисунок 7 – База знаний

Результат работы программы представлен на рисунке 8.

```

(root@NebuchadnezzaR) ~/bmstu/bmstu-diploma/diploma/src
-# swipl kvant4.pl
Welcome to SWI-Prolog (threaded, 64 bits, version 9.0.4)
SWI-Prolog comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY. This is free software.
Please run ?- license. for legal details.

For online help and background, visit https://www.swi-prolog.org
For built-in help, use ?- help(Topic). or ?- apropos(Word).

?- find_path("начало", "утверждён", Path, Prob, Steps).
Path = ["начало", "утверждение - НР", "утверждение - К", "проверка секретарём", "утверждение - ЗК", "рассмотрение в отделе", "утверждён"],
Prob = 0.0234375,
Steps = 6 .

```

Рисунок 8 – Результат работы программы

Вероятность успешно пройти всю цепочку составляет 2.3%. Распределение вероятностей представлено в таблице 1 в приложении А. Визуализация полученный данных представлена на рисунке 9. Совокупное время моделирование составило 2 миллисекунды.

Возьмём другой произвольный пример. Соответствующая модель представлена на рисунке 10.

Соответствующая база знаний представлена на рисунке 11.

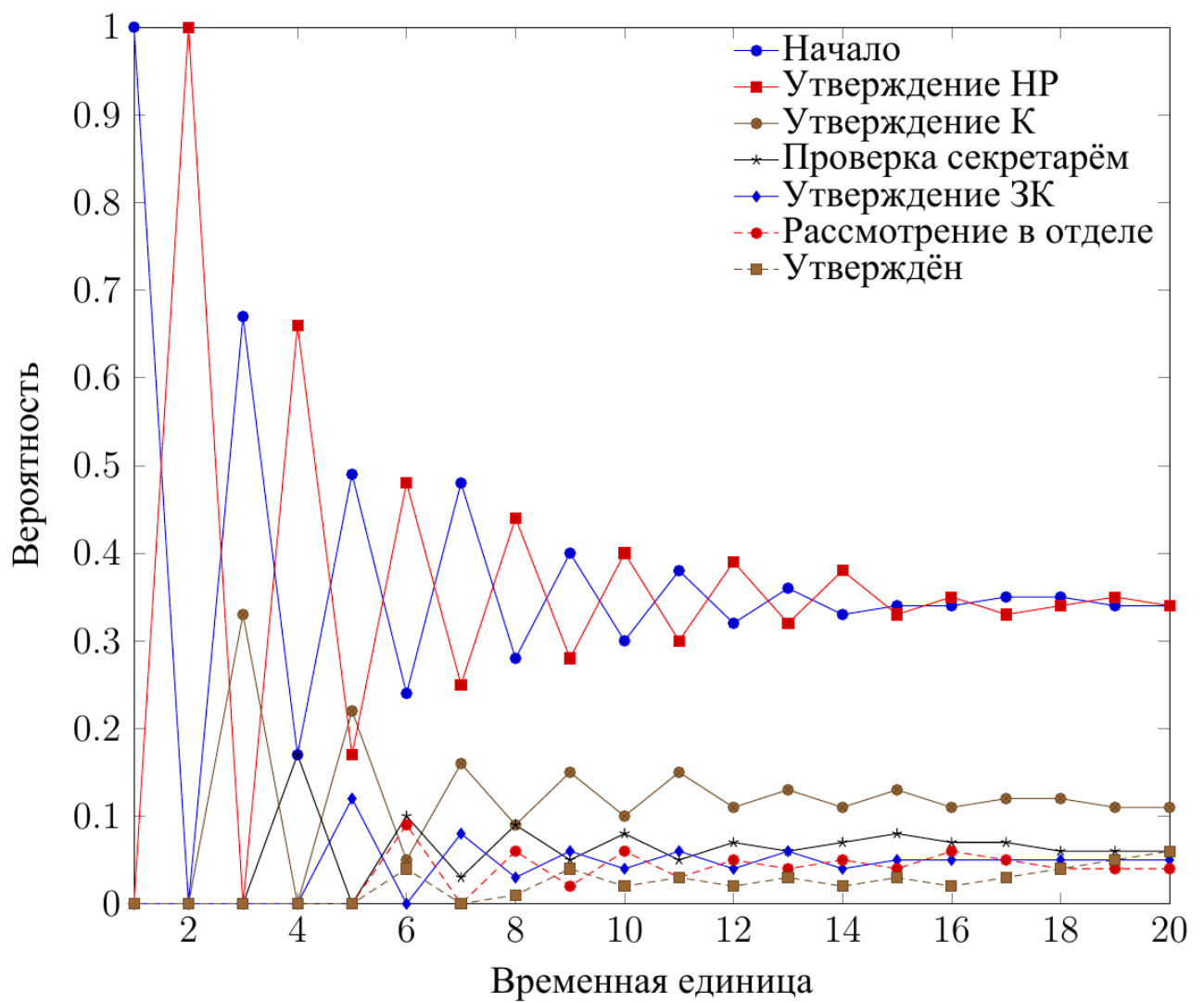


Рисунок 9 – График распределения вероятностей квантового моделирования

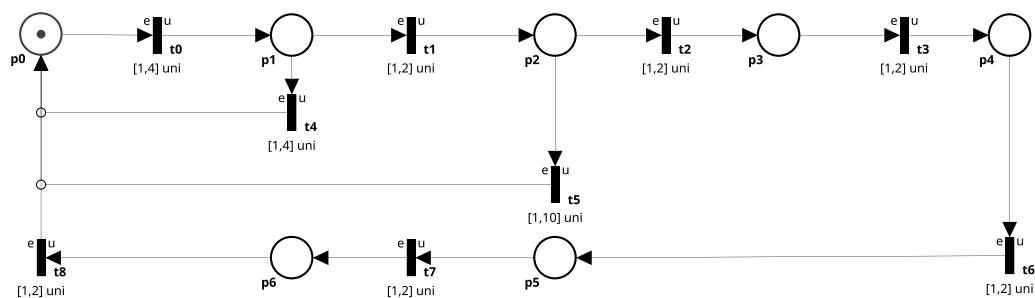


Рисунок 10 – Модель сети Петри

```
transition("p0", "p1", 1, 4).  
transition("p1", "p0", 1, 4).  
transition("p1", "p2", 1, 2).  
transition("p2", "p0", 1, 10).  
transition("p2", "p3", 1, 2).  
transition("p3", "p4", 1, 2).  
transition("p4", "p5", 1, 2).  
transition("p5", "p6", 1, 2).  
transition("p6", "p0", 1, 2).
```

Рисунок 11 – База знаний

Регенеративный анализ сети Петри представлен на рисунке 12.

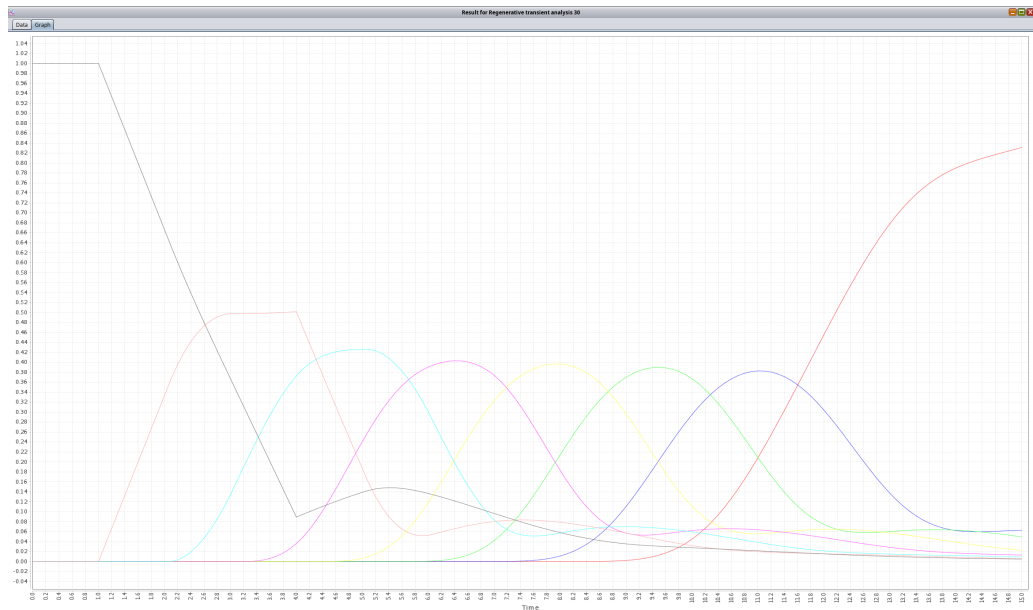


Рисунок 12 – Результат регенеративного анализа сети Петри

Результат моделирования методом квантовых шахмат представлен на рисунке 13.

Исходя из результатов, моделирование методом сетей Петри более точно отражает распределение вероятностей. Методу квантовых шахмат нужно на 20% больше шагов, чтобы сравняться с сетями Петри, что компенсируется более быстрым расчётом.

4.3 Вывод

Анализ данных показал, что максимальное время выполнения процесса может достигать 18 временных единиц, при этом вероятность успешного прохождения всей цепочки составляет 2.3%.

Квантовое моделирование продемонстрировало практически идентичные результаты распределения вероятностей по сравнению с моделированием с помощью сетей Петри. Однако, квантовое моделирование позволяет получить эти результаты в многократно быстрее, несмотря на невозможность отслеживания пути до конкретного статуса.

Результаты квантового моделирования также показали, что вероятность

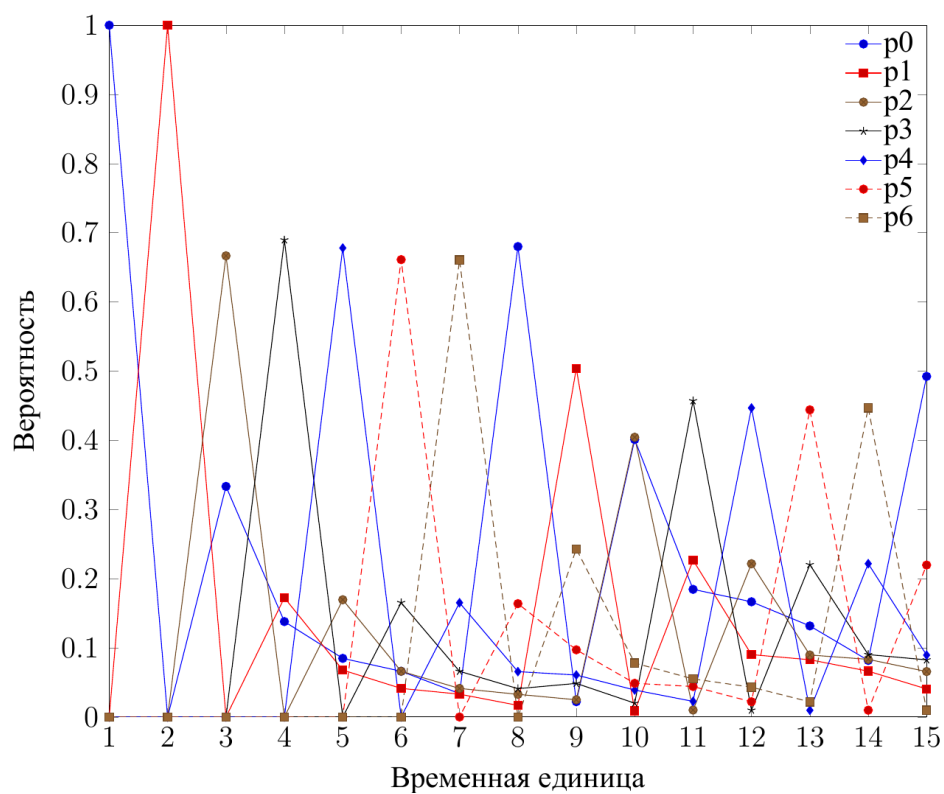


Рисунок 13 – Распределение вероятностей моделирования методом квантовых шахмат

нахождения в финальном статусе возрастает с каждой итерацией, что подтверждается регенеративным анализом сетей Петри.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое моделирование показало, что максимальное время выполнения процессов по утверждению темы может составить до 18 временных единиц. Полученные данные позволяют предложить меры по оптимизации текущих процессов, такие как объединение промежуточных состояний или разбиение длительных состояний на более короткие этапы. Системы ЭДО могут быть использованы для сокращения времени на переходы между состояниями процесса.

Квантовое моделирование позволило значительно быстрее подсчитать вероятность прохождения документа в финальное состояние и распределение вероятностей по времени, по сравнению с сетями Петри. Этот метод позволяет предварительно оценить сложность статусной модели документа. Моделирование с помощью сетей Петри дополнительно помогает установить временные границы для конкретных статусов, что является полезным для детальной оптимизации процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Stroganov Yuri V., Bogachenko Artyom E. Modeling Digital Document Flow Processes with Stochastic Timed Petri Nets // 2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). 2024. С. 1–5.
2. ГОСТ 34.601-90 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200006921>, свободный (дата обращения: 26 мая 2024 г.).
3. Terence Tao - Phase Space [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.math.ucla.edu/~tao/preprints/phase_space.pdf, свободный (дата обращения: 26 мая 2024 г.).
4. FIDE laws of chess [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fide.com/FIDE/handbook/LawsOfChess.pdf>, свободный (дата обращения: 26 мая 2024 г.).
5. Forsyth-Edwards Notation (FEN) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.chess.com/terms/fen-chess>, свободный (дата обращения: 26 мая 2024 г.).
6. 5D Chess With Multiverse Time Travel [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://store.steampowered.com/app/1349230/5D_Chess_With_Multiverse_Time_Travel/, свободный (дата обращения: 26 мая 2024 г.).
7. Oris Tool [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.oris-tool.org/>, свободный (дата обращения: 26 мая 2024 г.).
8. SWI-Prolog [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.swi-prolog.org/>, свободный (дата обращения: 26 мая 2024 г.).

9. Choi Hoon Kulkarni Vidyadhar G. Trivedi Kishor S. Transient analysis of deterministic and stochastic Petri nets // Application and Theory of Petri Nets 1993. Springer, 1993. C. 166–185.
10. German R., Logothetis D., Trivedi K.S. Transient analysis of Markov regenerative stochastic Petri nets: a comparison of approaches // Proceedings 6th International Workshop on Petri Nets and Performance Models. 1995. C. 103–112.
11. Miklos Telek Andras Pfening. Performance analysis of Markov regenerative reward models // Performance Evaluation. 1996. T. 27-28. C. 1–18.