

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НГУ)**

УТВЕРЖДАЮ

\_\_\_\_\_

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Рабочая программа дисциплины  
**Теория параллельных систем и процессов**

Направление подготовки  
**010200 – Математика и компьютерные науки**

Квалификация (степень) выпускника  
**Бакалавр**

Форма обучения  
**Очная**

Новосибирск 2014

## **Аннотация рабочей программы**

Дисциплина «Теория параллельных систем и процессов» является частью математического цикла ООП по направлению подготовки «010200 – Математика и компьютерные науки». Дисциплина реализуется на механико-математическом факультете НИУ НГУ кафедрой «Вычислительные системы».

Содержание дисциплины охватывает круг вопросов, связанных с элементами теории сетей Петри, семантическими моделями параллелизма, алгебраическими исчислениями и логиками параллельных процессов.

Дисциплина нацелена на формирование общекультурных компетенций ОК-6, ОК-8, ОК-11, ОК-12, профессиональных компетенций ПК-12, ПК-20, ПК-21, ПК-25, ПК-29 выпускника.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинары, практические занятия, контрольные работа и задание, самостоятельная работа студента.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля: текущий контроль успеваемости в форме контрольной работы и контрольного задания и итоговый контроль в форме экзамена.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2,5 зачетных единиц, 68 академических часа. Программой дисциплины предусмотрены 32 часов лекционных, 8 часов семинарских и 8 часов практических занятий, а также 18 часов самостоятельной работы студентов. Остальное время – контроль в форме контрольных работы и задания, а также экзамена.

## 1. Цели освоения дисциплины

Основной целью освоения дисциплины «Теория параллельных систем и процессов» является систематизация знаний в области формальных методов и средств спецификации, анализа и верификации параллельных систем и процессов.

Для достижения поставленной цели выделяются следующие задачи курса:

1. изучение теоретической части курса в соответствии с программой,
2. решение задач по моделированию и анализу поведения параллельных систем с использованием моделей сетей Петри и их расширений в системе PEP (Programming Environment based on Petri nets),
3. выполнение контрольных работ и заданий, сдача экзамена в соответствии с учебным планом.

Современный этап развития теоретической информатики характеризуется бурным ростом активности исследований в области разработки формальных методов спецификации, анализа и моделирования параллельных/распределенных систем, имеющих сложную структурную и функциональную организацию. К таким системам относятся коммуникационные протоколы, системы управления производством, распределенные операционные системы и т.д. Разработка корректных систем такого типа – нетривиальная задача, требующая для своего успешного решения проведения комплексных фундаментальных исследований, основанных на различных формальных методах и средствах, которые варьируются в зависимости от класса моделируемых систем, степени детализации их структуры и поведения, а также характера изучаемых проблем. На основе результатов и рекомендаций теоретических исследований ведется поиск и проверка новых архитектурных принципов конструирования параллельных/распределенных систем, изучаются методы распараллеливания алгоритмов и программ, проверяются новые способы организации программ и процессов, обосновываются программные конструкции, вводимые в языки параллельного программирования, отрабатываются методы структурного и семантического анализа параллельных программ и т.д.

В течение трех последних десятилетий теория параллелизма породила большое разнообразие моделей, теорем, алгоритмов и инструментов, предназначенных для спецификации, разработки и верификации параллельных/распределенных систем. Данный раздел теоретической информатики изучает фундаментальные понятия и законы параллельной обработки информации и на основании обнаруженных закономерностей строит более частные формальные модели исследуемых объектов, на которых ставит и решает прикладные задачи. Складываются устойчивые системы базовых понятий и общепринятых методик, появляются специальные периодические издания, регулярно проводятся научные конференции, посвященные данной тематике.

В начале курса делается краткий экскурс в историю изучаемой теории, рассматриваются предмет и задачи теоретических исследований в области параллельной обработки информации.

Центральное место в курсе занимает теория сетей Петри, которые являются одним из самых популярных формализмов для описания параллельных систем и процессов. Сети Петри были разработаны и используются, в основном, для анализа и моделирования различных систем. С их помощью могут быть промоделированы аппаратное и программное обеспечение ЭВМ, физические и химические системы, социальные и экономические задачи и др. Наиболее удобны сети Петри для моделирования параллельных систем, причем параллельность моделируется естественным и адекватным образом. В курсе рассматриваются методы анализа сетей Петри, позволяющие изучать поведение и свойства моделируемых систем. Также излагаются наиболее интересные и распространенные обобщения сетей Петри, предложенные для адекватного моделирования реальных параллельных систем, имеющих сложную структуру. Кроме того, предполагается проведение практических занятий с целью знакомства и освоения возможностей систем PEP (Programming Environment based on Petri nets) и CPN tools, предназначенных для

моделирования, анализа и верификации различных моделей сетей Петри.

Затем излагается материал по таким семантическим моделям параллелизма, как системы переходов, трассы Хоара, системы переходов с независимостью, трассы Мазуркевича, сети-процессы, частично-упорядоченные множества, структуры событий. Изучаются свойства этих моделей и показывается их достоинства для спецификации и анализа поведения параллельных систем. Рассматриваются различные эквивалентности параллельных процессов на основе трассового, тестового и бисимуляционного подходов. Устанавливаются взаимосвязи между перечисленными моделями и эквивалентностями.

Далее излагаются базовые понятия и законы алгебраических исчислений параллельных процессов на примере алгебры взаимодействующих процессов (CCS) Милнера. Также, рассматривается аппарат динамических и темпоральных логик для спецификации параллельных процессов. Обсуждаются основные идеи автоматической верификации параллельных систем (механические доказательства теорем и проверка модели (model checking)).

Методы теории параллелизма можно успешно применять в самых различных областях. Например, знание основ этой теории становится обязательным для специалистов по вычислительной технике, системному анализу, программированию и др.

## **2. Место дисциплины в структуре ООП бакалавриата**

Дисциплина «Теория параллельных систем и процессов» является частью математического цикла ООП по направлению подготовки «010200 – Математика и компьютерные науки».

Дисциплина «Теория параллельных систем и процессов» базируется на следующих дисциплинах ООП:

- Математическая логика (формализация методов рассуждений, логические связки, аксиоматические модели, модальные и темпоральные логики);
- Классическая алгебра (алгебраические операции, универсальная алгебра, алгебра множеств, алгебраическая система);
- Теория алгоритмов (понятие временной и емкостной сложности алгоритма);
- Теория программирования (теория схем программ);
- Теория графов (методы описания и анализа графовых моделей).

Результаты освоения дисциплины «Теория параллельных систем и процессов» используются в следующих дисциплинах данной ООП:

- Архитектура параллельных вычислительных систем;
- Языки и технологии параллельного программирования.

## **3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины «010200 – Математика и компьютерные науки»:**

- общекультурные компетенции: ОК-6, ОК-8, ОК-11, ОК-12;
- профессиональные компетенции: ПК-12, ПК-20, ПК-21, ПК-25, ПК-29.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- знать основные понятия и методы теории сетей Петри, базовые семантические модели параллелизма и их взаимосвязи, особенности формального моделирования параллельных систем и процессов;
- уметь строить модели для описания и исследования структуры и поведения параллельных систем и процессов;
- владеть методами моделирования, анализа и верификации поведения с целью проектирования корректных параллельных систем, а также навыками работы в системах CPN Tools и PER.

## **4. Структура и содержание дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2,5 зачетные единицы, 68 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)					Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекция	Семинары	Практические занятия	Самост. работа	Экзамен	
0.1	Основные понятия, терминология и основополагающие законы параллельной обработки информации. Исторический обзор формальных моделей параллельных систем и процессов.	6	1	2	0	0	0	0	
1.2	Элементы теории сетей Петри (СП). Основные понятия и формальные определения теории СП.	6	2	2	0	0	0	0	
1.3	Поведенческие свойства СП (живость, справедливость, ограниченность, безопасность) и их анализ. Разрешимые проблемы безопасности, ограниченности, живости, достижимости. Неразрешимые проблемы R-включения и R-эквивалентности.	6	3	2	0	2	2	0	
1.4	Подклассы СП (ординарные СП, синхрографы, автоматные сети, сети со свободным выбором, элементарные сетевые системы). Методы анализа поведенческих свойств подклассов СП.	6	4,5	4	0	0	2	0	
1.5	Языки СП. Помеченные СП. Классы языков СП и их характеристика. Разрешимые и неразрешимые свойства языков СП.	6	6	2	2		2	0	
1.6	Обобщения СП (ингибиторные сети, сети с приоритетами, дискретно-временные и непрерывно-временные СП, раскрашенные СП). Выразительная мощность моделей. Анализ поведения.	6	7-9	6	0	4	4	0	
1.7		6	10	0	0	2	0	0	<b>Прием задания, см. п. 6</b>
2.1	Семантические модели параллелизма. Интерливинговые модели. Трассы Хоара как пример модели с семантикой «линейного времени». Системы переходов как пример модели с семантикой «ветвистого времени».	6	10	2	1	0	2	0	
2.2	«Истинно параллельные модели». Модели с семантикой «линейного времени». Трассы Мазуркевича как пример модели с семантикой «линейного времени». Модели с семантикой «ветвистого времени»: системы переходов с независимостью, сети-процессы, частично-упорядоченные множества, структуры событий.	6	11	2	1	0	2	0	
2.3	Понятия эквивалентностей параллельных процессов: трассовый, тестовый, бисимуляционный подходы. Сравнительный анализ параллельных моделей и эквивалентностей.	6	12,13	2	0	0	1	0	
2.4		6	13		2	0	0	0	<b>Контрольная работа,</b>

									см. п. 6
3.1	Алгебраические исчисления параллельных процессов. Методы композиции параллельных процессов и способы их взаимодействия на примере CCS (исчисления взаимодействующих систем). Структурная операционная и денотационная семантика исчисления CCS. Эквивалентность и конгруэнтность CCS-выражений. Теорема разложения.	6	14	2	1	0	1	0	
4.1	Логика параллельных процессов. Динамические и темпоральные логики как инструмент спецификации и верификации параллельных процессов. Синтаксис и семантика темпорального языка с семантикой «линейного времени» LTL. Синтаксис и семантика темпоральных языков с семантикой «ветвистого времени» STL, STL*. Сравнение выразительных мощностей темпоральных языков.	6	15	2	1	0	1	0	
4.2	Методы автоматической верификации. Механические доказательства теорем. Метод проверки модели (model checking method). Алгоритмы верификации сетевых моделей с использованием LTL- и STL-формул.	6	16	2	0	0	1	0	
		6		32	8	8	18	2	

## 5. Образовательные технологии

Используется лекционно-семинарская система обучения. Также с целью овладения методами и навыками, необходимыми для моделирования, анализа и верификации параллельных систем, проводятся практические занятия, на которых студенты работают с программными системами PEP (Programming Environment based on Petri Nets) и CPN Tools.

## 6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины

*Перечень примерных заданий для самостоятельной работы.*

- Рассматриваемая задача о шести обедающих философах является модификацией задачи, предложенной Дейкстрой. Шесть философов проводят свое время, размышляя и поедая макароны. Они сидят за круглым обеденным столом, вокруг которого стоят 6 стульев. На столе лежат 6 вилок так, что между каждыми двумя философами лежит одна вилка, т.е. слева и справа от каждого философа находится по вилке. Вилка с номером  $i$  находится слева от философа с номером  $i$ . Для еды философу необходимо иметь две вилки. Если философ не может немедленно взять две вилки, то он ждет, когда сможет приступить к еде. Вилки поднимаются со стола по одной, причем первой поднимается вилка с четным номером. Закончив еду, философ кладет вилки на стол. С помощью системы PEP построить раскрашенную СП, моделирующую описанное решение; выполнить симуляцию сети и проверить выполнение свойств живости и ограниченности. Обосновать полученные результаты.
- В магазине имеется два типа касс – с терминалом для пластиковых карт и без него. Заказ проходит следующие стадии: 1. чек принимается; 2. если касса оборудована терминалом для пластиковых карт, то происходит списание денег с карты через внутренний банковский терминал (доступ эксклюзивный), иначе принимаются наличные от клиента; 3. происходит регистрация чека во внутренней базе данных (доступ эксклюзивный); 4. чек печатается. С помощью системы PEP построить временную СП, моделирующую описанную систему, выполнить симуляцию сети и

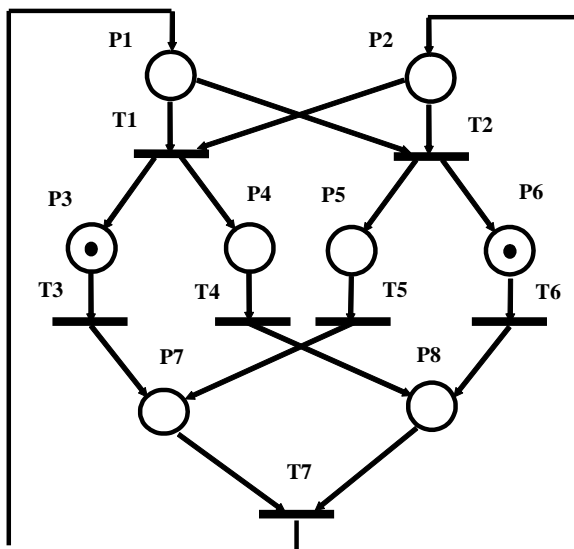
проверить ее на свойства живости и ограниченности. Обосновать полученные результаты.

- Система автомат-продавец состоит из трех различных автоматов  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  и двух операторов  $F_1$  и  $F_2$ . Оператор  $F_1$  воздействует на автоматы  $M_1$  и  $M_2$ , а оператор  $F_2$  – на  $M_1$  и  $M_3$ . Заказы требуют двух стадий обработки. Сначала они должны быть обработаны автоматом  $M_1$ , затем либо автоматом  $M_2$ , либо автоматом  $M_3$ . Заказ может поступать только, если есть свободный оператор. С помощью системы РЕР построить сеть Петри, моделирующую данную систему, выполнить симуляцию сети и проверить ее на свойства живости и ограниченности. Обосновать полученные результаты.
- Протокол коммуникаций позволяет двум сторонам обмениваться сообщениями по одному через ненадежную среду. Ненадежность среды заключается в том, что сообщения и подтверждения могут теряться при передаче (т.е. не достигать получателя). Для восстановления от потерь при передаче используется механизм повторной посылки сообщения при превышении времени ожидания подтверждения, т.е. время отправления сообщения записывается, и, если по истечении определенного промежутка времени не получено подтверждение, сообщение посылается еще раз и т.д. С помощью системы РЕР построить временную сеть Петри, моделирующую данную систему, выполнить симуляцию временной сети и проверить ее на свойства живости и ограниченности. Обосновать полученные результаты.

*Образцы контрольных вопросов для текущего контроля.*

*Вариант 1.*

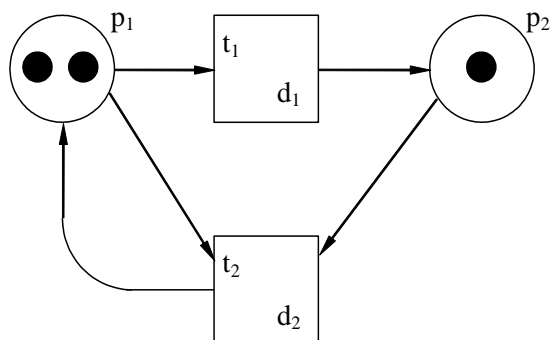
1. Анализ свойства ограниченности сетей Петри на основе построения полного покрывающего дерева.
2. Синтаксис и семантика раскрашенных СП.
3. Установить, является ли сеть Петри со свободным выбором живой на основе метода Коммонера.



*Вариант 2.*

1. Выразительная мощность модели сетей Петри с ингибиторными дугами.
2. Методы анализа поведения синхрографов.

3. Определить, является ли живой временная сеть Петри.



Вариант 3.

1. Понятие бисимуляционной эквивалентности систем переходов.
2. Проблемы  $R$ -эквивалентности и  $R$ -включения СП.
3. Построить множество конфигураций стабильной структуры событий, состоящей из компонент:  $E = \{e_1, e_2, e_3\}$ ;  $Con = \{\{e_1, e_2\}, \{e_1, e_3\}, \{e_2, e_3\}\}$  и  $\emptyset \vdash e_1, \emptyset \vdash e_2, \{e_1\} \vdash e_3, \{e_2\} \vdash e_3$ .

**Текущий контроль.** В течение семестра принимается задание и выполняется контрольная работа. Задание считается выполненным, если студент продемонстрировал соответствующие навыки по анализу и верификации сетевых моделей с использованием систем CPN Tools и PER и ответил на контрольные вопросы преподавателя. Оценку «отлично» студент получает в случае полного выполнения задания; «хорошо» – если результаты автоматической верификации поведения сетевых моделей корректны, однако студент испытывает затруднения в беседе с преподавателем, неточно определяет и/или понимает понятия из лекционного курса; «удовлетворительно» – если полученные студентом результаты частично корректны, он отвечает на вопросы по темам из лекционного курса, однако не может пояснить детали, привести примеры и т.д. Контрольные работы оцениваются аналогично. Выполнение задания и контрольной работы является обязательным для всех студентов, а результаты текущего контроля служат основанием для выставления оценок в ведомость контрольных недель на факультете.

**Итоговый контроль.** Для контроля усвоения дисциплины в конце семестра предусмотрен экзамен.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Вирбицкайте И.Б. Семантические модели параллельных программ и процессов. Уч. пос. НГУ, 1996. – 92с.
2. Вирбицкайте И.Б. Сети Петри: модификации и расширения. Уч. пос. НГУ, 2005. – 126с.
3. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160с.
4. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264с.
5. Dezel J. Esparza J. Free-Choice Petri Nets. Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science. – 1994.
6. Jensen K. Coloured Petri nets. – Springer-Verlag. – Vol.1,2,3. 1996.
7. Mazurkiewicz A. Basic notions of trace theory // Lect. Notes Comput. Sci. – 1988. – Vol. 354. – P. 285–363.



8. Milner R. A Calculus of communicating systems // Lect. Notes Comput. Sci. – 1980. – Vol. 92.
9. Winskel G. An introduction to event structures // Lect. Notes Comput. Sci. – V. 354. – 1988. – p. 364-397.
10. Winskel G., Nielsen M. Models for concurrency // Hand-book of Logic in Comput. Sci. – 1995. – Vol. 4.

б) дополнительная литература:

1. Карп Р.М., Миллер Р.Е. Параллельные схемы программ // Кибернетический сборник. Вып. 13. – М.: Мир, 1976.– с. 5–61.
2. Bouyer, P., Haddad, S., Reynier P.-A. Timed unfoldings for networks of timed automata // Lect. Notes Comput. Sci. – 2006. – Vol. 4218. – P. 292–306.
3. De Nicola, R., Hennessy, M. Testing equivalence for processes // Theoretical Computer Science. – 1984. – Vol. 34. – P. 83–133.
4. Dezel J., Reisig W., Rosenberg G. (Eds.) Lectures on Concurrency and Petri Nets // Lect. Notes Comput. Sci. – 2004. – Vol. 3098.
5. Engelfriet J. Branching processes of Petri nets // Acta Informatica. – 1991. – Vol. 28. – P. 576–591.
6. van Glabbeek R.J., Goltz U. Refinement of actions and equivalence notions for concurrent systems // Acta Informatica. – 2001. – Vol. 37. – P. 229–327.
7. Hoogers, P.W., Kleijn, H.C.M., Thiagarajan, P.S. An event structure semantics for general Petri nets // Theoretical Computer Science. – 1996. – Vol. 153. – P. 129–170.
8. Merlin P., Faber D.J. Recoverability of communication protocols // IEEE Trans. of Communication. – 1976. – Vol. COM-24(9) – (1976).
9. Nielsen M., Plotkin G., Winskel G. Petri nets, event structures and domains. Theoretical Computer Science. – 1981. – Vol. 13(1). – P. 85–108.
10. Nielsen M., Rozenberg G., Thiagarajan P.S. Behavioural notions for elementary net systems // Distributed Computing. – 1990. – V.4, N1. –P. 45–57.
11. Nygaard M., Winskel, G. Domain theory for Concurrency // Theoretical Computer Science. – 2004. – V.103. – P. 153–190.
12. Starke P. Some properties of timed nets under the earliest firing time // Lect. Notes Comput. Sci. – 1990. – Vol. 424. – P. 418–432.
13. Rozenberg, J. Engelfriet. Elementary net systems. Lect. Notes Comput. Sci. – 1998. – Vol. 1491. – P. 12–121.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

1. Вирбицкайте И.Б. Сети Петри: модификации и расширения. (электронный учебник) <http://i-portal.nsu.ru/lemma.dll?db=Seti&int=VIEW&el=1&templ=I206>
2. Система CPN Tools. <http://wiki.daimi.au.dk/cpntools/cpntools.wiki>
3. Система PEP ((Programming Environment based on Petri nets) <http://parsys.informatik.uni-oldenburg.de/~pep/>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Рабочие станции для индивидуальной работы и удаленного доступа к вычислительным комплексам.
- Ноутбук, медиа-проектор, экран.
- Программное обеспечение для демонстрации слайд-презентаций.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО с учетом рекомендаций и **ПрООП ВПО** по направлению «010200 – Математика и компьютерные науки».

Автор: \_\_\_\_\_ **Вирбицкайте Ирина Бонавентуровна**  
д.ф.-м.н., профессор  
в.н.с. ИСИ СО РАН

Рецензент (ы) \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Программа одобрена на заседании \_\_\_\_\_  
*(Наименование уполномоченного органа вуза (УМК, НМС, Ученый совет))*  
от \_\_\_\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_