

Теория параллельных систем и процессов – активно развивающийся раздел компьютерных наук, в задачу которого входит разработка и исследование формальных моделей для спецификации и анализа систем с независимой работой компонентов. Среди таких моделей наибольшую известность приобрели сети Петри (СП) и процессные алгебры (ПА). Понятие эквивалентности – важнейшее понятие теории вычислительных процессов. Поведенческие эквивалентности позволяют сравнивать системы с учетом различных аспектов их функционирования. На сегодняшний день бисимуляционная эквивалентность – одно из наиболее популярных отношений, используемых для сопоставления поведения систем и процессов. В монографии разработан и исследован широкий спектр поведенческих (в том числе бисимуляционных) эквивалентностей для СП и ПА, а также для подклассов и расширений этих моделей.

В книге представлены следующие результаты.

На СП с видимыми и невидимыми переходами и их подклассах введен и изучен большой набор базисных, обратных-прямых и учитывающих места поведенческих эквивалентностей в семантиках от интерливинговой до истинного параллелизма и от линейного до ветвистого времени.

На временных сетях Петри с видимыми и невидимыми переходами и их подклассах разработан и исследован ряд временных, невременных и региональных интерливинговых эквивалентностей в следовой и бисимуляционной семантиках.

На стохастических сетях Петри с невидимыми переходами определен и изучен ряд базисных, обратных и обратных-прямых эквивалентностей в интерливинговой и шаговой, а также в следовой и бисимуляционной семантиках.

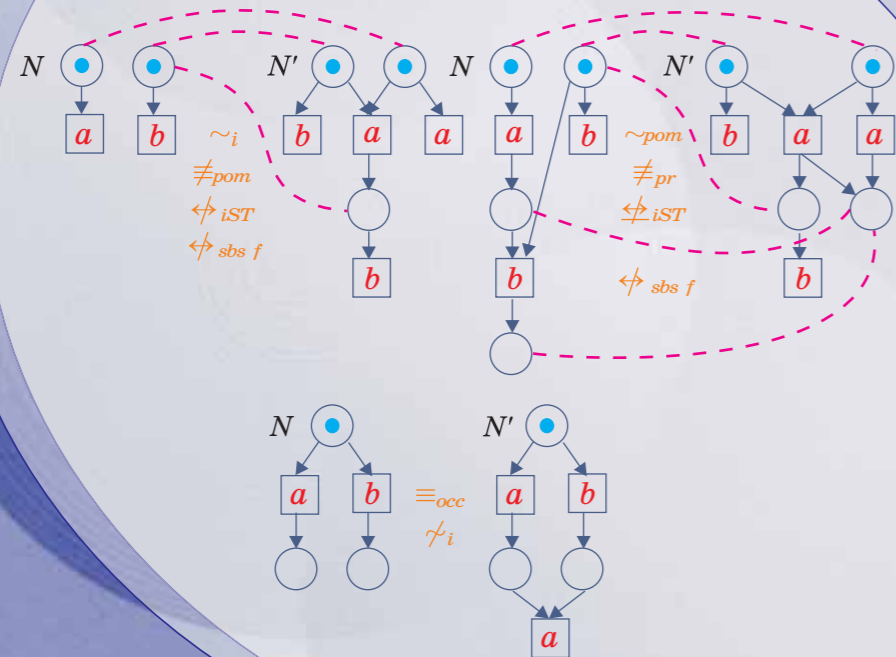
Исследованы семантические эквивалентности стандартных и стохастических ПА, а также их связь с сетевыми эквивалентностными отношениями. Разработан и реализован алгоритм автоматической проверки семантической эквивалентности формул.

Монография предназначена студентам, аспирантам и исследователям, интересующимся теоретической информатикой, в частности формальным моделированием и анализом свойств поведения параллельных систем и процессов.

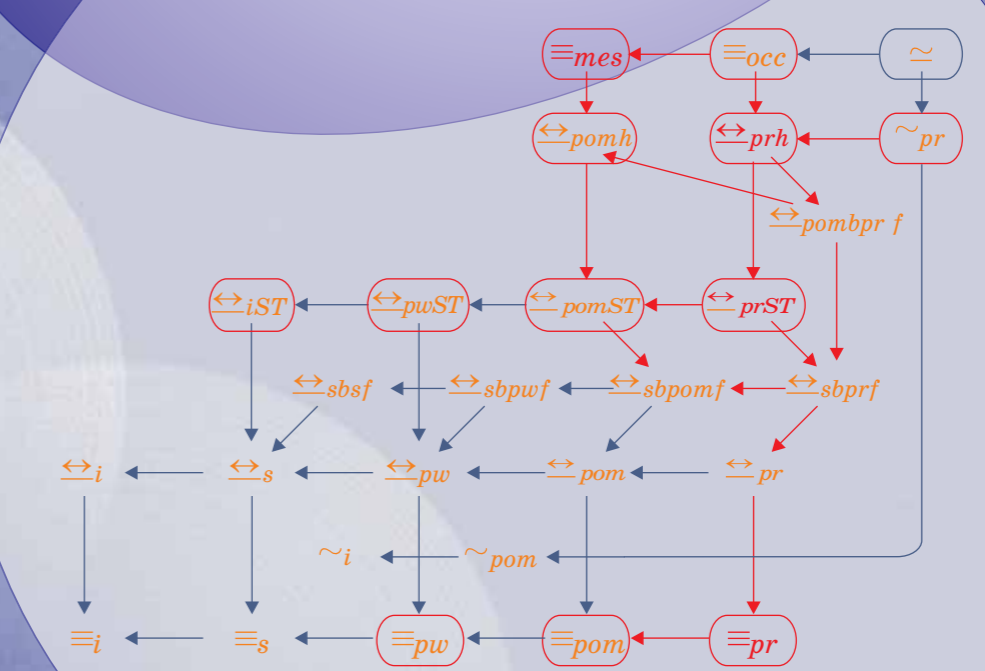
Эквивалентности для поведенческого анализа параллельных и распределенных вычислительных систем

И.В. ТАРАСЮК

ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ПОВЕДЕНЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ



И.В. ТАРАСЮК



Российская академия наук
Сибирское отделение

Институт систем информатики
им. А.П. Ершова

И.В. Тарасюк

**Эквивалентности для поведенческого анализа
параллельных и распределенных
вычислительных систем**

Ответственный редактор
д-р физ.-мат. наук *В.Н. Касьянов*

Новосибирск
Академическое издательство “Гео”
2007

УДК 519.681.3
ББК 22.18
Т191

Тарасюк, И.В. Эквивалентности для поведенческого анализа параллельных и распределенных вычислительных систем / И.В. Тарасюк ; Ин-т систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН. – Новосибирск : Академическое изд-во “Гео”, 2007. – 321 с. – ISBN 978-5-9747-0098-9.

В монографии разработан и исследован широкий спектр поведенческих эквивалентностей на таких известных формальных моделях для спецификации и анализа параллельных систем, как сети Петри и алгебры процессов. Отношения эквивалентности изучены также на подклассах и расширениях этих моделей: временных и стохастических сетях Петри, алгебрах стохастических процессов.

Для студентов, аспирантов и исследователей, интересующихся теоретической информатикой, в частности, формальным моделированием и анализом свойств поведения параллельных систем и процессов.

Tarasyuk, I.V. Equivalences for behavioral analysis of concurrent and distributed computing systems / I.V. Tarasyuk ; A.P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS. – Novosibirsk : Academic Publishing House “Geo”, 2007. – 321 p. – ISBN 978-5-9747-0098-9.

In the monograph, a wide range of behavioral equivalences has been proposed and investigated on the well-known models for concurrent systems specification and analysis such as Petri nets and process algebras. The equivalence relations have been explored on subclasses and extensions of the models: time and stochastic Petri nets and stochastic process algebras.

For graduate and post-graduate students and researchers interested in theoretical computer science, in particular, formal modeling and analysis of behavioural properties of concurrent systems and processes.

Р е ц е н з е н т ы :
д-р техн. наук *О.Л. Бандман*,
канд. физ.-мат. наук *Ф.А. Мурзин*

Издается в авторской редакции

ISBN 978-5-9747-0098-9

© И.В. Тарасюк, 2007
© ИСИ СО РАН, 2007
© Академическое издательство “Гео”, 2007

Оглавление

1	Введение	7
I	Сети Петри	13
2	Основные определения	17
2.1	Мультимножества	17
2.2	Помеченные сети	18
2.3	Сети Петри	19
2.4	Частично упорядоченные множества	21
2.5	Структуры событий	22
2.6	C-процессы	23
2.7	O-процессы	26
3	Сети Петри с видимыми переходами	29
3.1	Базисные эквивалентности	29
3.1.1	Следовые эквивалентности	34
3.1.2	Бисимуляционные эквивалентности	34
3.1.3	Сохраняющие конфликт эквивалентности	38
3.1.4	Сравнение базисных эквивалентностей	39
3.2	Обратные-прямые эквивалентности	42
3.2.1	Последовательные выполнения	45
3.2.2	Обратные-прямые бисимуляционные эквивалентности	46
3.2.3	Сравнение обратных-прямых бисимуляционных эквивалентностей	46
3.2.4	Сравнение обратных-прямых бисимуляционных эквивалентностей с базисными эквивалентностями	47
3.2.5	Логическая характеристика	52
3.3	Эквивалентности мест	55
3.3.1	Бисимуляционные эквивалентности мест	55
3.3.2	Сравнение бисимуляционных эквивалентностей мест	57
3.3.3	Сравнение бисимуляционных эквивалентностей мест с базисными эквивалентностями и обратными-прямыми бисимуляционными эквивалентностями	57
3.3.4	Редукция сетей Петри с использованием бисимуляционных эквивалентностей мест	60
3.4	Сохранение эквивалентностей при детализациях	61
3.5	Эквивалентности на подклассах сетей Петри	72
3.5.1	Эквивалентности на последовательных сетях	72
3.5.2	Эквивалентности на строго помеченных сетях	75
3.5.3	Эквивалентности на T-сетях	79
3.6	Разрешимость эквивалентностей	81
4	Сети Петри с невидимыми переходами	83
4.1	Базисные τ -эквивалентности	85
4.1.1	τ -следовые эквивалентности	87
4.1.2	τ -бисимуляционные эквивалентности	88
4.1.3	Сохраняющие конфликт τ -эквивалентности	92

4.1.4	Сравнение базисных τ -эквивалентностей	92
4.2	Обратные-прямые τ -эквивалентности	96
4.2.1	Обратные-прямые τ -бисимуляционные эквивалентности	96
4.2.2	Сравнение обратных-прямых τ -бисимуляционных эквивалентностей	97
4.2.3	Сравнение обратных-прямых τ -бисимуляционных эквивалентностей с базисными τ -эквивалентностями	98
4.2.4	Логическая характеристика	101
4.3	Сравнение эквивалентностей с τ -эквивалентностями	103
4.4	Сохранение τ -эквивалентностей при детализациях	104
4.5	τ -эквивалентности на подклассах сетей Петри с невидимыми переходами	109
4.5.1	τ -эквивалентности на сетях Петри с видимыми переходами	109
4.5.2	τ -эквивалентности на последовательных сетях с невидимыми переходами	111
4.6	Разрешимость эквивалентностей	114
II	Временные сети Петри	117
5	Основные определения	121
5.1	Временные сети Петри	121
6	Временные сети Петри с видимыми переходами	123
6.1	Временные эквивалентности	123
6.2	Невременные эквивалентности	124
6.3	Региональные эквивалентности	124
6.4	Сравнение эквивалентностей	127
6.5	Сохранение эквивалентностей при временных детализациях	128
6.6	Эквивалентности на невременных сетях Петри	136
7	Временные сети Петри с невидимыми переходами	139
7.1	Временные τ -эквивалентности	139
7.2	Невременные τ -эквивалентности	140
7.3	Региональные τ -эквивалентности	141
7.4	Сравнение τ -эквивалентностей	142
7.5	Сравнение эквивалентностей и τ -эквивалентностей	143
7.6	Сохранение τ -эквивалентностей при временных детализациях	143
7.7	τ -эквивалентности на подклассах временных сетей Петри с невидимыми переходами	145
7.7.1	τ -эквивалентности на временных сетях Петри с видимыми переходами	145
7.7.2	τ -эквивалентности на невременных сетях Петри с невидимыми переходами	145
III	Стохастические сети Петри	147
8	Основные определения	153
8.1	Сети Петри с ингибиторными дугами и приоритетами	153
8.2	Основы теории вероятностей	154
8.3	Стохастические процессы	157
8.4	Цепи Маркова с дискретным временем	158
8.5	Полумарковские цепи	160
8.6	Цепи Маркова с непрерывным временем	161
8.7	Общая схема анализа цепей Маркова	162
8.8	Методы вычислений для анализа цепей Маркова	163
9	Обзор стохастических сетей Петри	165
9.1	Стохастические сети Петри с дискретным временем	165
9.1.1	Описание модели	165
9.1.2	Методы анализа	166
9.1.3	Примеры	167
9.1.4	Выводы	168

9.2	Стохастические сети Петри с непрерывным временем	168
9.2.1	Описание модели	168
9.2.2	Методы анализа	169
9.2.3	Примеры	171
9.2.4	Выводы	172
9.3	Обобщенные стохастические сети Петри	173
9.3.1	Описание модели	173
9.3.2	Методы анализа	174
9.3.3	Примеры	175
9.3.4	Выводы	177
9.4	Стохастические сети Петри с детерминированным временем	177
9.4.1	Описание модели	178
9.4.2	Методы анализа	178
9.4.3	Примеры	180
9.4.4	Выводы	183
9.5	Итоги обзора	183
10	Помеченные дискретно-временные стохастические сети Петри	187
10.1	Описание модели	188
10.1.1	Вероятности и достижимость	188
10.1.2	Невидимые шаги	189
10.2	Базисные вероятностные τ -эквивалентности	191
10.2.1	Вероятностные τ -следовые эквивалентности	191
10.2.2	Вероятностные τ -бисимуляционные эквивалентности	192
10.3	Обратные и обратные-прямые вероятностные τ -эквивалентности	193
10.3.1	Обратные вероятностные τ -бисимуляционные эквивалентности	193
10.3.2	Обратные-прямые вероятностные τ -бисимуляционные эквивалентности	195
10.4	Сравнение вероятностных τ -эквивалентностей	195
10.5	Логическая характеристика вероятностных τ -эквивалентностей	196
10.5.1	Логика <i>IPML</i>	198
10.5.2	Логика <i>SPML</i>	200
10.6	Стационарное поведение	201
IV	Алгебры процессов	203
11	Алгебра конечных процессов <i>AFP</i>₂	209
11.1	Синтаксис	209
11.2	Семантика	210
11.2.1	Денотационная семантика	210
11.2.2	Аксиоматизация	211
11.2.3	Каноническая форма формул	212
11.3	Эквивалентности на <i>A</i> -сетях	214
11.4	Сравнение сетевых и алгебраических эквивалентностей	216
11.5	Автоматизация проверки алгебраической эквивалентности	218
11.5.1	Система правил переписывания <i>RWS</i> ₂	218
11.5.2	Доказательство сходимости <i>RWS</i> ₂	221
12	Алгебра конечных помеченных процессов <i>AFLP</i>₂	225
12.1	Синтаксис	226
12.2	Семантика	226
12.2.1	Денотационная семантика	226
12.2.2	Аксиоматизация	228
12.2.3	Каноническая форма формул	230
12.2.4	Операционная семантика	231
12.3	Эквивалентности на слабо помеченных <i>A</i> -сетях	233
12.4	Сравнение сетевых и алгебраических эквивалентностей	238

12.5	Введение алгебраических аналогов сетевых эквивалентностей	239
12.5.1	Процессные подформулы	239
12.5.2	Следовые эквивалентности	239
12.5.3	Бисимуляционные эквивалентности	240
12.5.4	Сохраняющие конфликт эквивалентности	241
12.5.5	Сравнение сетевых эквивалентностей с их алгебраическими аналогами	241
13	Алгебра конечных стохастических процессов $StAFP_0$	245
13.1	Синтаксис	245
13.2	Семантика	245
13.3	Аксиоматизация	247
14	Заключение	249
A	Доказательства	251
A.1	Доказательство предложения 3.2.4	251
A.2	Доказательство предложения 3.4.2	252
A.3	Доказательство предложения 3.4.3	254
A.4	Доказательство предложения 3.4.6	256
A.5	Доказательство предложения 4.2.4	257
A.6	Доказательство утверждения 10.4.1	259
B	Описание программы CANON	261
C	Примеры работы программы CANON	275
C.1	Формула $(a; (b \nabla c)) \parallel (a \nabla b)$	275
C.2	Формула $(a \nabla (b; e)) \parallel (d \nabla (c; e))$	282
	Литература	289
	Предметный указатель	318

Предметный указатель

- $=_2$, 210
- $=_2^+$, 210
- $=_{BFL}$, 102
- $=_{HML}$, 52
- $=_{IPML}$, 198
- $=_{L2}$, 228
- $=_{L2}^+$, 228
- $=_{PBFL}$, 53
- $=_{PrBFL}$, 54
- $=_{SPBFL}$, 102
- $=_{SPML}$, 200
- $=_{St0}$, 247
- $=_{\Theta_2}$, 213
- ЦССП, 184
- Цепь марковская, 157
 - дискретно-временная, 157
 - встроенная, 160
 - непрерывно-временная, 157
 - полу-, 160
- ДДВССП, 149
- ДССП, 178
- ДВМЦ, 157
 - ДВССП, 166
 - ОССП встроенная, 174
 - ПДВССП, 189
- ДВССП, 165
- Декартово произведение, 21
- Детализация
 - SM-, 63
 - временная, 129
- Дисперсия, 156
- Достижимости граф, 20
 - видимый, 190
 - ST-, 36
- Достижимости множество, 20
 - видимое, 190
- Эквивалентность
 - бисимуляционная
 - авто- каноническая мест, 60
 - $AFLP_2$, 240
 - мест, 56
 - мест строгая, 56
 - невременная, 124
 - обычная, 35, 56
 - обратная-прямая, 46
 - региональная, 127
 - сохраняющая историю, 38
 - временная, 124
 - ST-, 37
 - бисимуляционная ST-
 - $AFLP_2$, 241
 - бисимуляционная сохраняющая историю
 - $AFLP_2$, 241
 - логическая
 - BFL , 102
 - HML , 52
 - $IPML$, 198
 - $PBFL$, 53
 - $PrBFL$, 54
 - $SPBFL$, 102
 - $SPML$, 200
 - семантическая
 - $AFLP_2$, 228
 - AFP_2 , 210
 - $StAFP_0$, 247
 - семантическая наблюдаемая
 - $AFLP_2$, 228
 - AFP_2 , 210
 - сетей относительно формул
 - $AFLP_2$, 238
 - AFP_2 , 217
 - следовая
 - ЧС, 34
 - $AFLP_2$, 240
 - ЧУММ, 34
 - $AFLP_2$, 240
 - интерливинговая, 34
 - $AFLP_2$, 239
 - невременная, 124
 - процессная, 34
 - региональная, 126
 - шаговая, 34
 - $AFLP_2$, 240
 - временная, 123
 - сохраняющая конфликт
 - МСС, 38
 - О-процессная, 39
 - формул $AFLP_2$, 241
 - τ -бисимуляционная
 - невременная, 141
 - обычная, 88
 - обратная-прямая, 96
 - региональная, 142
 - сохраняющая историю, 89

- сохраняющая историю ST-, 89
- вероятностная, 193
- вероятностная обратная, 194
- вероятностная обратная-прямая, 195
- ветвистая обычная, 91
- ветвистая сохраняющая историю, 91
- временная, 140
- ST-, 89
- ST- ветвистая, 91
- ST- ветвистая сохраняющая историю, 92
- τ -следовая
 - ЧС, 88
 - ЧУММ, 88
 - интерливинговая, 87
 - невременная, 140
 - региональная, 142
 - шаговая, 87
 - вероятностная интерливинговая, 192
 - вероятностная шаговая, 192
 - временная, 140
- τ -сохраняющая конфликт, 92
- ФССП, 184
- Формула
 - $AFLP_2$, 226
 - AFP_2 , 209
 - BFL , 101
 - HML , 52
 - $IPML$, 198
 - $PBFL$, 53
 - $PrBFL$, 54
 - $SPBFL$, 102
 - $SPML$, 200
 - $StAFP_0$, 245
- Функция
 - масс вероятностей, 155
 - плотности вероятностей, 155
 - распределения вероятностей, 155
- ГССП, 184
- Гомоморфизм
 - О-сети в сеть Петри, 27
 - С-сети в сеть Петри, 24
- Ингибиторно-приоритетная сеть Петри, 153
- Категоризация
 - множества, 21
 - сети Петри, 60
 - каноническая, 60
- Класс
 - эквивалентности, 21
 - изоморфизма, 22
- МЦ, 157
- МП, 157
- МПС, 19
- Маркировка, 19
 - ST-, 35
- Множество
 - частично упорядоченное, 22
 - помеченное, 21
- Мультимножество, 17
 - частично упорядоченное, 22
- Мультиструктура событий, 23
- НВМЦ, 157
 - НВССП, 170
- НВСП, 136
- НВССП, 168
- ОССП, 173
- ОВСП, 149
- Ожидание математическое, 155
- ПА, 205
- ПДВССП, 188
- ПМЦ, 160
- Переходов система, 231
- Переноса свойство, 60
- Подформула процессная $AFLP_2$, 239
- Поднятие отношения мест, 56
- Помеченная сеть, 18
 - О-, 26
 - С-, 23
 - маркированная, 19
- Процесс
 - О-, 27
 - С-, 24
 - марковский, 157
 - стохастический, 157
 - ST-, 36
 - ST- τ -, 88
- РДССП, 149
- РССП, 149
- Регион временной, 124
- СП, 19
- СПА, 206
- ССП, 149
- Семантика
 - денотационная
 - $AFLP_2$, 227
 - $StAFP_0$, 245
 - операционная
 - $AFLP_2$, 232
- Сеть Петри, 19
 - А-, 214
 - Т-, 79
 - последовательная, 72
 - с невидимыми переходами, 83
 - последовательная, 111
 - строго помеченная, 75
 - SM-, 63
- След
 - ЧУММ, 34
 - $AFLP_2$, 240
 - видимый, 88
 - МСС, 38
 - О-процессный, 39
 - интерливинговый, 34
 - $AFLP_2$, 239
 - видимый, 87

- невременной, 124
 видимый, 140
 процессный, 34
 региональный, 126
 видимый, 142
 шаговый, 34
 $AFLP_2$, 240
 видимый, 87
 вероятностный
 интерливинговый видимый, 192
 шаговый видимый, 192
 временной, 123
 видимый, 140
- Стохастическая сеть Петри
 цветная, 184
 детерминированная, 178
 расширенная, 149
 дискретно-временная, 165
 детерминированная, 149
 помеченная, 188
 флюидная, 184
 гибридная, 184
 непрерывно-временная, 168
 обобщенная, 173
 расширенная, 149
- Структура событий, 23
 помеченная, 22
- ВДВМЦ, 160
 ВСП, 121
 Величина случайная, 155
 Выполнение
 полное С-сети, 24
 последовательное сети Петри, 45
- Выполнимость формул
 BFL , 101
 HML , 52
 $IPML$, 198
 $PBFL$, 53
 $PrBFL$, 54
 $SPBFL$, 102
 $SPML$, 200
- Временная сеть Петри, 121
 невременная, 136
 с невидимыми переходами, 145
 обобщенная, 149
 с невидимыми переходами, 139
 SM-, 128
- 0**, 159
1, 159
 2^X , 121
- Act , 18
 Δ_{Act} , 226
 \overline{Act} , 226
 Act^\pm , 36
 \underline{Act}_τ , 83
 \overline{Act} , 226
- $AFLP_2$, 225
 \mathbf{AFLP}_2 , 226
 \mathbf{AFP}_2 , 210
 al, 214
 \aleph_N , 153
 α , 209
 $\alpha(P)$, 212
 $\bar{\alpha}$, 209
 $\bar{\alpha}(P)$, 212
 Δ_α , 209
 $\Delta_\alpha(P)$, 212
 $\hat{\alpha}(P)$, 212
 \overline{A} , 154
 \approx_* , $*$ $\in \{i, s, pw, pom, pr\}$, 56
- β_σ^σ , 45
 \mathbf{BFL} , 101
 \leftrightarrow_* , $*$ $\in \{i, s, pw, pom, pr\}$, 35
 \leftrightarrow_{*b**f} , $*$, $** \in \{i, s, pw, pom, pr\}$, 46
 $\leftrightarrow_{*bfp}^\tau$, $*$ $\in \{i, s\}$, 195
 $\leftrightarrow_{*b**f}^\tau$, $*$, $** \in \{i, s, pw, pom\}$, 96
 $\leftrightarrow_{*bp}^\tau$, $*$ $\in \{i, s\}$, 194
 \leftrightarrow_{*h} , $*$ $\in \{pom, pr\}$, 38
 $\leftrightarrow_{ibr}^\tau$, 91
 $\leftrightarrow_{iSTbr}^\tau$, 91
 $\leftrightarrow_{pomhbr}^\tau$, 91
 $\leftrightarrow_{pomhSTbr}^\tau$, 92
 $\leftrightarrow_{pomhST}^\tau$, 89
 $\leftrightarrow_{pomh}^\tau$, 89
 $\leftrightarrow_{*p}^\tau$, $*$ $\in \{i, s\}$, 193
 \leftrightarrow_r , 127
 \leftrightarrow_r^τ , 142
 \leftrightarrow_{*ST} , $*$ $\in \{i, pw, pom, pr\}$, 37
 $\leftrightarrow_{*ST}^\tau$, $*$ $\in \{i, pw, pom\}$, 89
 \leftrightarrow_t , 124
 \leftrightarrow_*^τ , $*$ $\in \{i, s, pw, pom\}$, 88
 \leftrightarrow_t^τ , 140
 \leftrightarrow_u , 124
 \leftrightarrow_u^τ , 141
- \mathcal{C} , 228
 $canon(P)$, 213
 $Concess(M)$, 154
 $\#_N$, 19
 $cont(P)$, 212
 $cont^+(P)$, 212
 $cont^-(P)$, 212
 $\Delta_{cont}(P)$, 212
 $CTMC(N)$, 170
- $D(\xi)$, 156
 \mathcal{D}_2 , 210
 \mathcal{D}_2^+ , 210
 $\{\delta\}$, 124
 $[\delta]$, 124
 \diamond_N , 19
 \mathcal{D}_{L2} , 227

$\mathcal{D}_{L_2}^+$, 228
 $\downarrow_N x$, 19
 $\downarrow_N x$, 19
 $\downarrow x$, 21
 \mathcal{D}_{St0} , 245
 $DTMC(N)$, 166
 $DTMC^*(N)$, 190

 $\mathcal{E}(E)$, 241
 $\mathcal{E}(N)$, 27
 E^+ , 232
 \mathbf{E} , 158
 $EDTMC(N)$, 174
 $EDTMC^*(N)$, 181
 $Ena(M)$, 20
 \equiv_i , 34
 \equiv_i^τ , 87
 \equiv_{mes} , 38
 \equiv_{mes}^τ , 92
 \equiv_{occ} , 39
 \equiv_{pom} , 34
 \equiv_{pom}^τ , 88
 \equiv_{pr} , 34
 \equiv_{pw} , 34
 \equiv_{pw}^τ , 88
 \equiv_r , 126
 \equiv_r^τ , 142
 \equiv_s , 34
 \equiv_s^τ , 87
 \equiv_t , 123
 \equiv_t^τ , 140
 \equiv_u , 124
 \equiv_u^τ , 140
 $E \xrightarrow{G} \tilde{E}$, 232
 $E \simeq E'$, 226
 η , 21
 $\eta |_Y$, 21
 $\eta_1 \triangleleft \eta_2$, 21
 $\eta_1 \trianglelefteq \eta_2$, 21
 $\eta \succ \eta'$, 22
 η_C , 24
 η_G , 232
 $\eta \simeq \eta'$, 22
 $\eta \sqsubseteq \eta'$, 22
 $E \triangleleft F$, 230
 $E \trianglelefteq F$, 230
 Ev , 226
 $Ev(E)$, 226
 $Ev(X)$, 227
 Δ_{Ev} , 226
 $\Delta_{Ev}(E)$, 226
 $\Delta_{Ev}(X)$, 227
 \overline{Ev} , 226
 $\overline{Ev}(E)$, 226
 $\overline{Ev}(X)$, 227
 \widehat{Ev} , 226

$\widehat{Ev}(E)$, 226
 $\widehat{Ev}(X)$, 227

 F_ξ , 155
 f_ξ , 155

 Γ , 194
 $G \xrightarrow{A} \tilde{G}$, 239
 $G \xrightarrow{a} \tilde{G}$, 239
 $G \xrightarrow{c} \tilde{G}$, 239
 $G \xrightarrow{U} \tilde{G}$, 239
 $G \xrightarrow{\hat{G}} \tilde{G}$, 239

 H_N , 153
 \mathbf{HML} , 52

 $Image(\pi, a)$, 52
 $IntTraces(E)$, 239
 $IntTraces(N)$, 34
 \mathbf{IPML} , 198

 L_N , 18
 LTS , 231
 lab , 226
 L_E , 226

 $M(\xi)$, 155
 M_N , 19
 $|M|$, 17
 $Mark_A$, 170
 $\mathcal{M} \xrightarrow{a_P} M$, 194
 $\mathcal{M} \xrightarrow{a} M$, 194
 $\mathcal{M} \xrightarrow{a_P} M$, 194
 $MD(N)$, 179
 $M \xrightarrow{a_P} \mathcal{L}$, 193
 $M \xrightarrow{a_P} \tilde{M}$, 190
 $M \xrightarrow{A} \mathcal{L}$, 193
 $M \xrightarrow{a} \mathcal{L}$, 193
 $\mathcal{M} \xrightarrow{A} M$, 194
 $M \xrightarrow{A_P} \mathcal{L}$, 192
 $M \xrightarrow{a_P} \mathcal{L}$, 193
 $\mathcal{M} \xrightarrow{A_P} M$, 194
 $M \xrightarrow{A_P} \tilde{M}$, 190
 $M \xrightarrow{a_P} \tilde{M}$, 190
 $M \xrightarrow{A} \tilde{M}$, 190
 $M \xrightarrow{a} \tilde{M}$, 190
 $M \xrightarrow{a_P} \tilde{M}$, 190
 $ME(N)$, 179
 $MEStructs(N)$, 38
 $M \xrightarrow{A_P} \tilde{M}$, 189
 $M \xrightarrow{a_P} \tilde{M}$, 189
 $M \xrightarrow{A} \tilde{M}$, 20, 189
 $M \xrightarrow{a} \tilde{M}$, 20, 189
 $M \xrightarrow{\omega} \tilde{M}$, 20
 $M \rightarrow_P \tilde{M}$, 189

- $M \xrightarrow{\sigma} \widetilde{M}$, 20
 $M \xrightarrow{t}_P \widetilde{M}$, 189
 $M \xrightarrow{t} \widetilde{M}$, 20, 189
 $M \xrightarrow{U}_P \widetilde{M}$, 188
 $M \xrightarrow{U} \widetilde{M}$, 20, 189
 $M \rightarrow \widetilde{M}$, 20, 189
 $M \xrightarrow{t}$, 20
 $M \xrightarrow{U}$, 20

 $N |_X$, 18
 N/ε , 60
 N , 17
 N_f^X , 17
 N^X , 17
 N^\bullet , 19
 $\bullet N$, 19
 $N \simeq N'$, 18
 ν , 231

 \mathcal{O}_{L2} , 232
 \mathcal{O}_{L2}^+ , 232
 Ω_N , 165
 Ω_P , 247

 \mathbf{P} , 158
 $\mathbf{P}(i)$, 179
 p_{in} , 63
 P_N , 18
 p_{out} , 63
 p_ξ , 155
 $Past(\pi, \sigma)$, 46
 \mathbf{PBFL} , 53
 p^\bullet , 18
 $PE(t, M)$, 169
 $PF(U, M)$, 165
 ϕ_P , 247
 π , 24
 $\Pi(N)$, 24
 $\Pi(N, M)$, 24
 (π_E, π_P) , 36
 $(\pi_E, \pi_P) \Rightarrow (\tilde{\pi}_E, \tilde{\pi}_P)$, 91
 $(\pi_E, \pi_P) \rightarrow (\tilde{\pi}_E, \tilde{\pi}_P)$, 37
 $\Pi_{max}(N)$, 24
 π_N , 24
 $\pi \xrightarrow{A} \tilde{\pi}$, 26
 $\pi \xrightarrow{\hat{\pi}} \tilde{\pi}$, 24
 $\pi \xrightarrow{\omega} \tilde{\pi}$, 26
 $\pi \xrightarrow{\sigma} \tilde{\pi}$, 26
 $\pi \Rightarrow \tilde{\pi}$, 90
 $\pi \rightarrow \tilde{\pi}$, 24
 $\pi \xrightarrow{V} \tilde{\pi}$, 26
 $\pi \simeq \pi'$, 24
 ϖ , 27
 ϖ_{max} , 27
 ϖ_N , 27

 π_W , 36
 $\bullet p$, 18
 $PM(M, \widetilde{M})$, 189
 $PM^*(M, \widetilde{M})$, 190
 $PM_A^*(\mathcal{M}, M)$, 194
 $PM_A^*(M, \mathcal{L})$, 192
 $Pomsets(E)$, 240
 $Pomsets(N)$, 34
 \mathbf{PrBFL} , 54
 \preceq_N , 19
 \prec_N , 19
 $ProcessNets(N)$, 34
 $PS(A, M, \widetilde{M})$, 189
 $PS^*(A, M, \widetilde{M})$, 190
 $PS_i^*(a, M, \widetilde{M})$, 190
 $PSF(E)$, 239
 $PSF_{max}(E)$, 239
 ψ^* , 202
 $P \simeq P'$, 212
 $\psi : O \rightarrow N$, 27
 $PS^*(\Sigma, M)$, 202
 $PT(U, M)$, 166
 $PT^*(\sigma)$, 192
 $PT^*(\sigma)$, 192
 $P \triangleleft Q$, 213
 $P \trianglelefteq Q$, 213
 $\wp(N)$, 27
 $\wp_{max}(N)$, 27

 \mathbf{Q} , 161
 Q_N , 122
 $Q \xrightarrow{a} \tilde{Q}$, 140
 $Q \xrightarrow{t} \tilde{Q}$, 140
 $Q \xrightarrow{t} \tilde{Q}$, 140
 $Q \xrightarrow{a} \tilde{Q}$, 124
 $Q \xrightarrow{t} \tilde{Q}$, 124
 $Q \xrightarrow{a} \tilde{Q}$, 140
 $Q \xrightarrow{a} \tilde{Q}$, 122
 $Q \xrightarrow{\delta} \tilde{Q}$, 140
 $Q \xrightarrow{\delta} \tilde{Q}$, 122
 $Q \xrightarrow{t}$, 122
 $Q \xrightarrow{t} \tilde{Q}$, 140
 $Q \xrightarrow{t} \tilde{Q}$, 122
 $Q \Rightarrow \tilde{Q}$, 140
 $[Q]$, 124

 $\mathcal{R}_i(N)$, 60
 $\overline{\mathcal{R}}$, 56
 R^\bullet , 19
 \mathbb{R} , 155
 \mathbb{R}_+ , 121
 $ref(N, a, D)$, 63
 $RegStates(N)$, 124
 $RegTraces(N)$, 126

- Regul*(η), 227
Return _{i} , 159
Return _{i} (k), 159
RG(N), 20
RG^{*}(N), 190
 ρ , 242
 $\bullet R$, 19
RS(N), 20
RS(N, M), 20
RS^{*}(N), 190
RS _{T} (N), 173
RS _{V} (N), 173
Runs(N), 45
*RWS*₂, 218

 S_N , 124
S _{TS} , 231
s _{TS} , 231
 $|\sigma|$, 45
 \sim_* , $\star \in \{i, s, pw, pom, pr\}$, 56
SJ(M), 169
SJ(s_i), 160
 \smile_N , 19
SPBFL, 102
SPML, 200
 $s \xrightarrow{a} \tilde{s}$, 231
 $s \xrightarrow{a}_{TS} \tilde{s}$, 231
 $S \xrightarrow{a} \tilde{S}$, 141
 $S \xrightarrow{a} \tilde{\tilde{S}}$, 126
 $S \xrightarrow{\surd} \tilde{S}$, 141
 $S \xrightarrow{\surd} \tilde{\tilde{S}}$, 126
 $S \xrightarrow{t} \tilde{S}$, 141
 $S \xrightarrow{t} \tilde{\tilde{S}}$, 126
 $S \Rightarrow \tilde{S}$, 141
ST(π, σ), 46
ST – $\Pi(N)$, 37
ST – *PSF*(E), 240
ST – *RG*(N), 36
ST – *RS*(N), 36
ST ^{τ} – $\Pi(N)$, 89
StAFP₀, 245
States(N), 122
StepTraces(E), 240
StepTraces(N), 34
stutt(π, σ), 99

 T_N , 18
 \mathcal{T}_{TS} , 231
 t^\bullet , 18
 $^\circ t$, 153
 Θ_2 , 211
 Θ_{L2} , 228
 Θ_{St0} , 247
TimeTraces(N), 123
 $\bullet t$, 18
 T_N^\pm , 36

trace(π, σ), 99
*tre*f(N, a, D), 129
TS(F), 231
TS(F), 232
TS_{max}(F), 232

 $\mathcal{U}(N)$, 27
 U^\bullet , 18
 $\bullet U$, 18
UntimeTraces(N), 124
 Υ_N , 121

 $\varphi : C \rightarrow N$, 24
 $\varpi \rightarrow \tilde{\varpi}$, 27
 $\varpi \simeq \varpi'$, 27
vis(C), 83
vis($\mathcal{E}(N)$), 92
vis(η), 88
vis(O), 83
vis(Σ), 87
vis(σ), 87
vis(ζ), 92
VisImage(M, A), 200
VisImage(M, a), 198
VisImage(π, a), 102
VisIntProbTraces(N), 192
VisIntTraces(N), 87
VisMEStructs(N), 92
VisPomsets(N), 88
VisRegTraces(N), 142
VisStepProbTraces(N), 192
VisStepTraces(N), 87
VisTimeTraces(N), 140
VisUntimeTraces(N), 140

 W_N , 18

 X^+ , 227
 X^- , 227
 Δ_X , 227
 Ξ , 214
 ξ , 155
 Ξ_L , 233

 ζ , 22
 $\zeta|_Y$, 23
 ζ_F , 241
 ζ_O , 26
 $\zeta \simeq \zeta'$, 23

Научное издание

Тарасюк Игорь Валерьевич

**Эквивалентности для поведенческого анализа
параллельных и распределенных
вычислительных систем**

Утверждено к печати Ученым советом
Института систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН

Корректор *В.В. Борисова*
Технический редактор *О.М. Вараксина*
Компьютерная верстка *И.В. Тарасюк*
Оформление обложки *Л.Н. Ким*

Подписано в печать 27.12.07. Формат 60 × 84 1/8.
Печать офсетная. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 40,0.
Тираж 300 экз. Заказ No. 244

НП «Академическое издательство «Гео»
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3
тел./факс: (383) 330-79-08, <http://www.izdatgeo.ru>