

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Буренкова Владимира Сергеевича  
**«Методы и средства верификации протоколов когерентности памяти»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.13.11 - «Математическое и программное обеспечение  
вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей»

### **Актуальность темы исследования**

Число ядер в современных промышленно выпускаемых микропроцессорах постоянно увеличивается, так как основным направлением повышения производительности вычислительных систем становится именно объединение нескольких ядер на одном кристалле. Основной проблемой, возникающей при создании многоядерных микропроцессоров с общей памятью, является обеспечение согласованного (когерентного) состояния памяти. Так как переходы между основными состояниями кэш-контроллеров не являются атомарными, а происходят через множество промежуточных состояний, являющихся специфичными для каждого микропроцессора, уровень сложности верификации таких систем является крайне высоким.

Разработка механизмов обеспечения когерентности памяти осуществляется в два этапа: проектирование протокола когерентности и реализация протокола в аппаратуре. Ошибки в протоколе когерентности особенно критичны и должны быть выявлены до начала реализации подсистемы памяти. В настоящее время распространенной практикой является анализ протокола его разработчиками вручную, а затем проверка его реализации тестовыми программами с псевдослучайными воздействиями. Однако псевдослучайные тестовые последовательности не обеспечивают полноты покрытия пространства состояний протокола за приемлемое время, верификация реализации протокола проходит в отсутствие всякой

уверенности в корректности самого протокола, и, кроме того, такой подход откладывает начало верификации на месяцы с момента начала проектирования. Таким образом, задача разработки новых методов и средств верификации самих протоколов когерентности памяти **является актуальной.**

### **Достоверность и обоснованность результатов**

Достоверность научных положений диссертации обеспечивается строгим математическим обоснованием: построением модели протоколов когерентности памяти, которая базируется на формальной семантике языка Promela с последующим математическим доказательством корректности процедуры абстракции. Автором изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения исследований в области верификации протоколов когерентности памяти.

Диссертация содержит 161 страницу и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Список литературы содержит 122 наименования. Достоверность научных положений, сформулированных в диссертации, подтверждается практическими разработками, проводимыми в АО «МЦСТ». Научные положения и выводы диссертации вполне обоснованы.

### **Научная новизна исследования**

Научной новизной обладают следующие выносимые на защиту результаты, полученные лично автором в ходе диссертационного исследования:

1. Предложенный автором оригинальный метод построения абстрактных формальных моделей протоколов когерентности памяти, основанный на синтаксических преобразованиях Promela-моделей, позволяющий существенно сократить пространство исследуемых состояний.

2. Сформулированная и доказанная теорема о сохранении абстрактными преобразованиями свойств-инвариантов, определяющая корректность предложенного метода верификации.

3. Разработанные алгоритмы преобразования дерева абстрактного синтаксиса, которое является промежуточным представлением Promela-моделей, позволяющие автоматически выполнять предложенные преобразования моделей.

### **Практическая ценность диссертации**

Практическая значимость диссертации подтверждается успешной реализацией разработанных методов и средств в программной системе, с помощью которой проведена верификация протокола когерентности 16-ядерной системы из микропроцессоров Эльбрус-4С, разработанной в АО «МЦСТ». Кроме того, сам подход к разработке Promela-процессов, моделирующих кэш-контроллеры и системный коммутатор, методика параметризованной верификации формальных моделей протоколов когерентности памяти, а также программный инструмент, позволяющий автоматизировать преобразования Promela-моделей, могут также найти применение в разработке других современных многоядерных микропроцессоров.

### **Основные результаты диссертации**

Все основные положения диссертации достаточно полно отражены в 16 научных публикациях автора, прошли апробацию на различных научно-технических конференциях (в том числе зарубежных) и семинарах. Выпущенные по теме работы публикации характеризуют значительный личный вклад автора в развитие методов верификации протоколов когерентности памяти.

Диссертация соответствует специальности 05.13.11 - «Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей».

### **Недостатки и критические замечания**

1. В главах 1 и 4 говорится о том, что разработка формальных моделей протоколов когерентности памяти осуществляется на основе документации на протокол когерентности памяти, однако из текста диссертации не ясно, какого рода эта документация. Следовало бы пояснить, что является входными данными для исходной Promela-модели протокола.
2. Некоторую путаницу вносит наличие в главе 3 (подразделы 3.3 и 3.4) методики и метода с одинаковыми названиями (а именно: методика и метод верификации протоколов когерентности памяти), но представляющими собой различные этапы исследования. При этом методика обозначается автором как один из пунктов практической значимости работы и больше нигде не упоминается, в то время как метод – это одно из положений, выносимых на защиту.
3. Отсутствует обсуждение, насколько сложно применить предлагаемый подход для верификации других аналогичных протоколов когерентности, за основу которых взят, например, протокол MOESI.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации.

### **Выводы**

Диссертация Буренкова Владимира Сергеевича является законченной научно-исследовательской работой, имеющей существенное значение в области верификации протоколов когерентности памяти.

Полученные результаты работы отвечают поставленным в ней задачам. Содержание автореферата соответствует основным положениям

диссертации. Качество диссертации в полной мере отражено в печатных работах автора. В целом содержание работы согласуется с современным путем развития науки и техники.

Несомненной практической значимостью диссертации Буренкова В.С. является то, что ее результаты были применены при создании микросхем высокопроизводительных микропроцессоров для отечественной элементной базы.

Диссертация отвечает всем требованиям ВАК РФ, а ее автор Буренков В.С. несомненно заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.11 - математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей.

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,

заведующий сектором Федерального государственного учреждения «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»

Чибисов Петр Александрович

« 21 » апреля 2017 г.

Подпись  
Началь