

### **Список литературы**

1. *Кобаяси, Н.* Введение в нанотехнологию [Текст] / Н. Кобаяси. — Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2005. — 134 с.
2. *Ратнер, М.* Нанотехнология: простое объяснение очередной гениальной идеи [Текст] / М. Ратнер, Д. Ратнер. — Москва: Вальямс, 2005. — 240 с.
3. *Гусев, А.И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А.И. Гусев. — Москва: Физматлит, 2009. — 416 с.
4. *Андриевский, Р.А.* Наноструктурные материалы [Текст] / Р.А. Андриевский, Ф.В. Рагуля. — Москва: Академия, 2005. — 187 с.
5. *Суздаев, И.П.* Нанотехнология. Физикохимия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст] / И.П. Суздаев. — Москва: Комкнига, 2006. — 426 с.
6. *Пул, Ч.* Нанотехнологии [Текст] / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. — Москва: Техносфера, 2006. — 328 с.
7. *Хартман, У.* Очарование нанотехнологии [Текст] / У. Хартман. — Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2008. — 173 с.
8. *Рыбалкина, М.А.* Нанотехнологии для всех [Текст] / М.А. Рыбалкина. — М.: Nanotechnology NewsNetwork, 2005. — 444 с.
9. *Мелихов, И.В.* Направления развития нанохимии / И.В. Мелихов [Электронный ресурс] // Сетевая библиотека МИФИ. — 2010. — Режим доступа: <http://www.library.mephi.ru> (дата обращения: 11.10.2011).
10. *Гудилин, Е.А.* Лекция из цикла «Мир нанотехнологий» / Е.А. Гудилин [Электронный ресурс] // Что такое «нано»? — 2015. — Режим доступа: <http://www.nanonewsnet.ru/help/video/binom/gudilin> (дата обращения: 11.10.2015).

УДК [378.016 : 62-83] : 378.169

**А. М. Зюзев, Р. М. Юнусов, В. В. Ипполитов, Н. В. Шайхадарова**  
**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СИМУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ**

*Зюзев Анатолий Михайлович*

*a.m.zuzev@urfu.ru*

*Юнусов Рустам Мингайсинович*

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, г. Екатеринбург*

*Ипполитов Владимир Владимирович*

*Шайхадарова Надежда Владимировна*

*kaf.eap@yandex.ru*

*ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Россия, г. Екатеринбург*

**STATE AND PROSPECTS USING HARDWARE-SOFTWARE SIMULATOR  
ELECTRICAL COMPLEX IN EDUCATIONAL PROCESS**

*Zyuzev Anatoliy Mihailovich*

*Yunusov Rustam Mingaysinovich*

*Russian State Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia,  
Yekaterinburg*

***Ippolitov Vladimir Vladimirovich  
Shayhadarova Nadezhda Vladimirovna***

*Russian State professional and pedagogic University, Russia, Yekaterinburg*

***Аннотация.*** *Рассматриваются вопросы использования симуляторов реального времени в учебном процессе при изучении дисциплин, связанных с освоением систем электроприводов.*

***Abstract.*** *The problems of the use of real-time simulation in the educational process in the study of subjects related to the development of electric systems.*

***Ключевые слова:*** *симулятор, имитатор оборудования.*

***Keywords:*** *simulator, imitator of installation.*

В последнее время в сообществе ученых-практиков и преподавателей технических дисциплин всё чаще поднимаются вопросы, связанные с симуляцией работы систем электроприводов в реальном времени. Возникновение таких вопросов вызвано во первых сложностью проведения экспериментальных и лабораторных исследований на реальных установках, их дороговизной для учебных и научно-производственных заведений, высокими рисками повреждения дорогостоящего оборудования; во вторых появлением новых программно-аппаратных средств, позволяющих создавать симуляторы, способные моделировать работу электроприводов с высокой степенью достоверности.

В зависимости от поставленных учебных и научно-производственных задач симуляторы электрооборудования применяются для моделирования в реальном времени работы электродвигателя [1-3], преобразователя [4], систем «преобразователь-двигатель» или «преобразователь-двигатель-механизм» [5]. Например, для наладки системы управления преобразователем может использоваться симулятор силовой части электропривода, который принимает сигналы управления ключами преобразователя, моделирует работу ключей и электродвигателя и выдаёт сигналы обратных связей, необходимые системе управления. Симулятор работает по следующему циклу: чтение входных сигналов, их обработка и выдача выходных сигналов. Длительность этого цикла определяет область возможного применения симулятора: “длинные” циклы, как правило, достаточны для тиристорных преобразователей, для транзисторных преобразователей необходима минимальная длительность цикла.

Аппаратно-программный симулятор, выполненный на базе персонального компьютера, работающего под управлением операционной системы реального времени при наличии быстрого процессора позволяет реализовать сложные алгоритмы обработки входных сигналов с применением переменных двойной точности с плавающей запятой. Это гарантирует высокую точность расчета модели оборудования и минимизацию ошибок округления, что особенно актуально при наличии в модели объекта интеграторов. Но данный тип симулятора имеет низкую скорость выдачи выходных сигналов, обусловленную структурой персонального компьютера, что ограничивает область применения подобных симуляторов моделированием систем, содержащих тиристорный преобразователь [6].

Имитация работы транзисторного преобразователя требует большего быстродействия, обеспечить которое могут системы на основе цифрового сигнального процессора (DSP) или

программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Авторы не располагают информацией об использовании DSP для построения подобных симуляторов.

Представленный материал описывает опыт создания симулятора электропривода, работающего в реальном времени. Ключевой особенностью рассматриваемой системы является частота цикла её работы, равная 1 МГц. Один цикл работы симулятора включает в себя ввод в модель реальных сигналов управления силовыми ключами, расчёт уравнений математической модели силовой части электропривода и выдачу в реальном времени выходных переменных, являющихся аналогами тока, момента и скорости двигателя.

При создании симуляторов систем электроприводов используется концепция разработки программного кода, основанная на последовательном создании кода модели в среде MATLAB/Simulink с последующим ручным переносом её в среду LabVIEW. Описанная технология позволяет относительно быстро получить эталонную модель (в среде MATLAB/Simulink) и высокоэффективный код для ПЛИС (в среде LabVIEW). Проверка созданной в LabVIEW модели заключается в сравнении результатов её работы с результатами этой же модели, созданной в MATLAB/Simulink. Для получения кода, исполняемого ПЛИС с максимальным быстродействием, используются инструкции из раздела HighThroughputMath. Кроме того, операции деления по возможности заменяются операциями умножения, так как скорость выполнения их значительно выше.

Используя описанную методику, созданы математические модели, работающие в реальном времени, такие, как модель трехфазного тиристорного преобразователя напряжения [7], модель вентильного электродвигателя [8], модель трехфазного транзисторного инвертора напряжения [9], модель асинхронного электродвигателя в двухфазной системе координат [10], модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением [11].

Пример кода последней модели, созданного на основе системы уравнений (1), представлен на рис. 1.

$$\begin{cases} e_{II} = e_{\partial} + r_{я} \cdot i_{я} + r_{я} \cdot T_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} \\ m = i_{я} \cdot \varphi \\ e_{\partial} = \omega \cdot \varphi \\ m - m_c = T_j \cdot \frac{d\omega}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

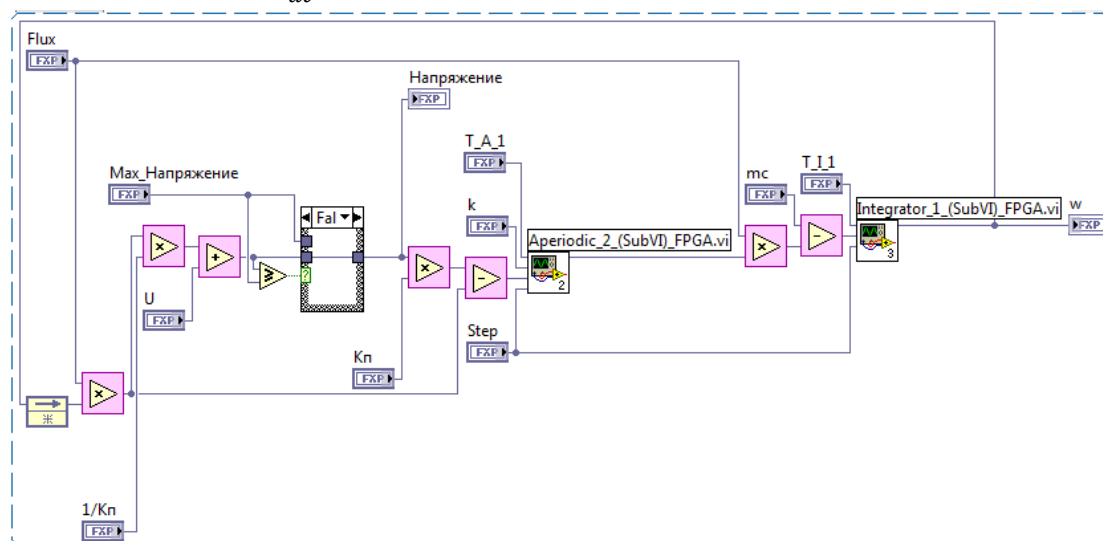


Рисунок 1 – Пример программного кода двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в среде LabVIEW FPGA

Одной из особенностей ПЛИС является то, что она обладает возможностью одновременного выполнения большого числа операций. Поэтому для получения высокой скорости расчета следует создать код, оптимизированный для параллельного выполнения. Использование “классического” последовательного построения алгоритма расчета Simulink- или LabVIEW-моделей приводит к неудовлетворительным (по скорости расчета) результатам. Оптимизированный для параллельного выполнения код может быть получен, если исходные уравнения записать в нормальной форме Коши. Тогда по каждому уравнению создается код, обеспечивающий расчёт соответствующей переменной на основе значений других переменных, взятых с предыдущего такта расчета.

При использовании достаточно малого (по сравнению с постоянными времени объекта моделирования) шага расчета такая концепция даёт вполне удовлетворительный результат. Например, при моделировании асинхронного электродвигателя с шагом расчета 1 мкс различие результатов последовательного и параллельного алгоритмов не превысило 1%(сравнение выполнено по электромагнитному моменту двигателя). Среднеквадратичное отклонение составило около 0,1%.

Ещё одной особенностью ПЛИС является то, что она не поддерживает математические команды над переменными с плавающей запятой, доступны только типы с фиксированной точкой и целочисленные. Целочисленная математика усложняет расчет моделей, так как требует использования специальной системы относительных единиц. Более удобным выглядит применение переменных с фиксированной точкой, для которых можно задать количество разрядов для хранения целой и дробной частей. Выбор разрядности целой и дробной частей должен быть сделан с учётом диапазона возможных значений переменных. Увеличение разрядности переменных приводит к снижению скорости расчёта и увеличению объёма программы. Поэтому возможна ситуация, когда из-за использования “длинных” переменных модель не поместится на используемую ПЛИС или будет рассчитываться недопустимо медленно. Уменьшение разрядности переменных приводит к понижению точности моделирования из-за накопления ошибок округления. Особенно это проявляется в моделях с большим числом дифференциальных уравнений.

На основе модели асинхронного электродвигателя проведено исследование погрешности расчёта от разрядности используемых переменных. В результате установлено, что при расчёте использованной модели асинхронного электродвигателя с шагом  $10^{-6}$  с достаточно применить переменные разрядностью 36 бит, из которых под дробную часть отведено 32 бит. При этом среднеквадратичная ошибка расчёта электромагнитного момента двигателя не превышает 0,01%.

В настоящее время для учебных целей разрабатывается комплексная модель, описывающая источник питания (аккумуляторную батарею), 2 двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, 2 преобразователя DC/DC с широтно-импульсной модуляцией (один в цепи якоря и один в цепи возбуждения) и модели механической нагрузки, имитирующей движение транспортного средства.

Сигналы управления ключами преобразователя от аппаратной части системы управления через модуль ввода/вывода подаются в модель силовой части электропривода, включающую модели преобразователя, электродвигателя и приводимого в движение механизма. Из модели силовой части электропривода в систему управления возвращаются аналоговые сигналы

обратной связи по току и скорости электродвигателей. Решение уравнений математической модели выполняется на ПЛИС с шагом 1 мкс. Симулятор обеспечивает возможность изучения и отладки системы управления электроприводом в реальном времени.

Поскольку аппаратная часть СУ ЭП находится в процессе разработки, для подтверждения работоспособности модели реального времени использован регулятор тока, созданный в среде LabVIEW. На рис. 2 показана реакция тока якоря на ступенчатое входное воздействие в контуре тока при стандартной настройке контура на модульный оптимум.

Опыт решения уравнений математических моделей электроприводов на базе ПЛИС позволил сделать вывод о возможности создания симуляторов электроприводов различного типа, работающих в реальном времени, которые могут быть использованы в широкой практике, позволяя существенно снизить затраты на проведение экспериментальных работ и расширить область возможных исследований без риска повреждения дорогостоящего оборудования. В совокупности с результатами работ по созданию программных имитаторов промышленных установок [12], симуляторы реального времени создают предпосылки для создания виртуального лабораторного практикума по группе дисциплин, включающих изучение систем автоматизированного электропривода бакалаврами и магистрами.

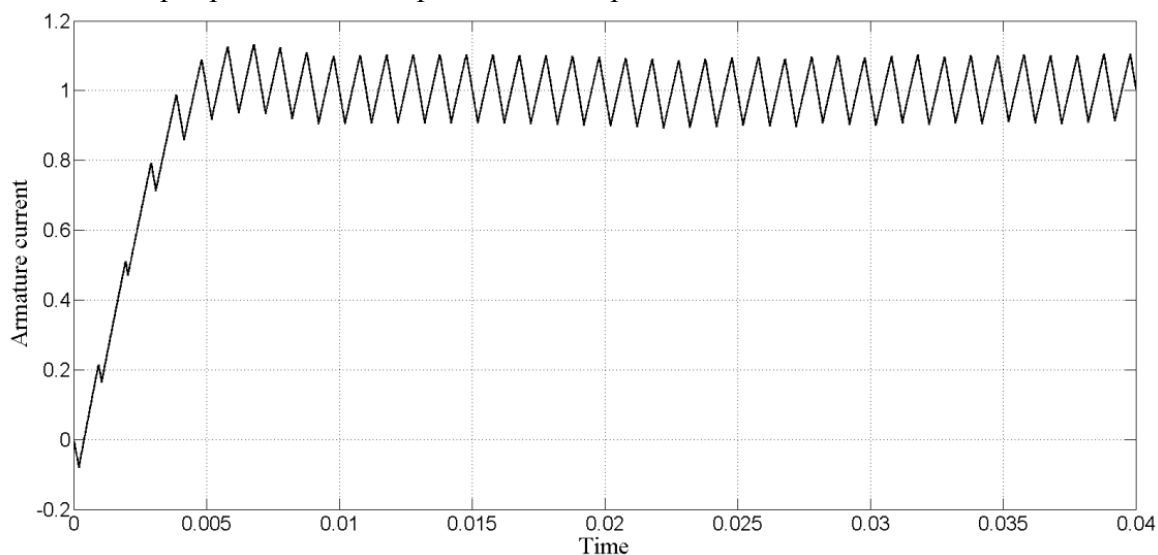


Рисунок 2 – Реакция тока якоря на ступенчатое входное воздействие в модели «реального времени»

#### ***Список литературы***

1. FPGA-Based Real-Time Simulation of Finite-Element Analysis Permanent Magnet Synchronous Machine Drives / Christian Dufour, Jean Bélanger, Simon Abourida, Vincent Lapointe / DOI 10.1109/EPE.2007.4417435.
2. FPGA based Hardware-in-the-Loop (HIL) simulation of induction machine model / Duman, E., Can, H., Akin, E. / DOI 10.1109/EPEPEMC.2014.6980564.
3. FPGA-based Real-Time Simulation of a Dual Three-Phase Induction Machine / Raul Gregor, Guido Valenzano, José Rodriguez-Pineiro, Jorge Rodas.
4. An FPGA-based real-time simulator for HIL testing of modular multilevel converter controller / Wei Li, Gregoire, L.-A., Souvanlasy, S., Belanger, J. / DOI 10.1109/ECCE.2014.6953678.

5. *Ziuzev, A.M., Nesterov K.E., Mudrov M.V.* The software-hardware simulator of the electric drive. Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 2014 16th European Conference on DOI: 10.1109/EPE.2014.6911018.

6. *Ahmadeev E., Beliaev D., Ilijin E., Weinger A.* The Virtual Test Bench of Medium Voltage Controlled AC Drives. 15th, IASTED International Conference on Applied Simulation and Modeling. APPLIED SIMULATION AND MODELLING; 340-345.

7. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В.* ПЛИС модель-симулятор трехфазного тиристорного преобразователя напряжения // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660944. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618877 от 03.09.2014.

8. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В.* ПЛИС модель-симулятор вентильного электродвигателя // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660942. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618880 от 03.09.2014.

9. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В., Костылев А.В.* ПЛИС модель-симулятор трехфазного транзисторного инвертора напряжения // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661060. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618875 от 03.09.2014.

10. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В., Костылев А.В.* ПЛИС модель-симулятор асинхронного электродвигателя в двухфазной системе координат // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №201461267. М.: РОСПАТЕНТ, 28.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618828 от 02.09.2014.

11. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Мудров М.В.* ПЛИС модель-симулятор двигателя постоянного тока с независимым возбуждением // Свидетельство РФ о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660946. М.: РОСПАТЕНТ, 20.10.2014. Уральский федеральный университет (RU), заявка № 2014618878 от 03.09.2014.

12. *Зюзев А.М., Нестеров К.Е., Инполитов В.В.* Программные имитаторы промышленных установок в учебном процессе: Материалы VII международной научно-практической конференции / ФГАОУ ВПО «РГППУ» – Екатеринбург, 2014. 603с.