

УДК 629.113; 303.732

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ БОРТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ КОЛЁСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Н. В. Бузунов, асп., Г. О. Котиев, д. т. н., проф. / Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
А. В. Мирошниченко, к. т. н. / ОКБ «Техника»

В настоящее время актуальной задачей является повышение качества функционирования электронных систем управления различными узлами и агрегатами транспортного средства. Бортные информационно-управляющие системы (БИУС) отвечают за скоростные характеристики колёсных и гусеничных машин, манёвренность, проходимость и многие другие свойства, в том числе безопасность движения. Применение подобных систем (системы активной безопасности, системы управления распределением мощности, системы управления подпрессориванием и др.) позволяет значительно снизить риск возникновения аварийной ситуации, улучшить эксплуатационные характеристики транспортного средства, в том числе энергоэффективность.

Отладку и определение оптимальных параметров опытного образца системы управления на этапе разработки возможно производить на основе математических моделей узлов. Компьютерные прототипы способствуют значительному упрощению процесса проектирования, помогают избежать множества ошибок на стадиях создания опытных образцов, что в дальнейшем ведёт к существенному уменьшению сроков разработки системы управления и значительному сокращению затрат. Модели реального времени позволяют производить проверку электронных блоков управления без создания соответствующих испытательных стендов на начальном этапе, что также положительным образом сказывается на экономической эффективности опытно-конструкторской работы.

Работоспособность имитационно-математической модели динамики объектов исследования в режиме реального времени характеризуется следующим критерием: качество функционирования зависит не только от логической корректности вычислений, но и от времени, за которое эти вычисления производятся. Модель работает в реальном времени, если быстроедействие соответствует скорости протекания физических процессов на объектах контроля или управления.

Математическая модель узла (агрегата) транспортного средства представляет собой систему дифференци-

альных уравнений (СДУ), описывающих поведение рассматриваемого устройства во времени на объекте и его взаимодействие с окружающей средой. Под методом реализации математической модели понимаются аналитические преобразования или числовые операции, посредством которых осуществляется моделирование, то есть определение перемещения и скорости объекта в функции времени по исходным дифференциальным уравнениям и начальным условиям. От выбора численного метода решения системы зависит точность получаемых решений и, что более важно в рамках данной задачи, скорость вычисления.

При переходе к реальному времени важную роль играет выбор точности вычисления модели, при которой корректный результат должен быть получен в строго определённый момент времени, в противном случае разрабатываемая модель не будет отвечать основному критерию Real-Time (RT). Повышение точности решения способствует приближению модели к поведению реального объекта, однако в данном случае существует достаточно высокая вероятность возрастания «запаздывания» при работе в реальном времени. В свою очередь, существенное снижение точности приведёт к значительному отличию результатов моделирования от параметров движения реального объекта. В соответствии с указанными утверждениями одним из основных вопросов, которые возникают при разработке Real-Time-модели, является правильный выбор точности решения на основе критериев корректности получаемого результата и минимизации задержек. Определить требуемую степень точности удастся только путём сравнения конкретной RT-модели с экспериментальными исследованиями или верифицированными математическими моделями рабочих процессов.

В применяемом подходе к построению RT-модели в качестве метода решения был выбран неявный метод с использованием производных высших порядков [1]. Использование формул на основе производных высших порядков (до третьего порядка) позволяет получить более точный результат без увеличения числа шагов.

Численное моделирование можно представить в виде следующей последовательности операций.

Пусть в момент времени t_i известны векторы перемещения x_i и скорости \dot{x}_i в проекциях на обобщённые координаты. Прогнозируются положение и скорость колёсной машины в момент времени $t_{i+1} = t_i + h$, где h — шаг прогноза. При этом для момента времени t_i вычисляются векторы временных производных разных порядков по обобщённым координатам. Как следует из формулы разложения функции в ряд Тейлора в окрестности некоторой точки, чем выше порядок определённых старших производных, тем точнее прогноз. В настоящее время в основном применяются численные методы, требующие вычисления только вторых производных. При этом для достижения заданной точности моделирования шаг выбирается достаточно малым, что приводит к росту объёма вычислений и, следовательно, времени проведения вычислительного эксперимента. В исследовании применён численный метод, основанный на использовании для прогнозирования не только вторых, но и третьих производных по времени для обобщённых координат.

Метод также позволяет оценить точность прогноза. Если она меньше заданной, прогнозирование повторяется от момента t_i , но с меньшим шагом. В случае удовлетворительной точности прогнозирование продолжается для времени $t_{i+2} = t_{i+1} + h$.

Процесс численного интегрирования дифференциального уравнения основан на разложении в ряд Тейлора функций $x(t)$, $\dot{x}(t)$ в окрестности точки t_i и включает в себя три этапа.

1. Предварительный прогноз перемещения и скорости с точностью порядка h^4 и h^3 соответственно:

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot \dot{x}_i + \frac{h^2}{2} \cdot \ddot{x}_i + \frac{h^3}{3!} \cdot \dddot{x}_i, \quad (1)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + h \cdot \ddot{x}_i + \frac{h^2}{2} \cdot \dddot{x}_i. \quad (2)$$

По итогам вычисления определяются значения второй и третьей производных функции в точке $i + 1$. Полученные на данном этапе значения функции, а также её первой, второй и третьей производных представляют собой первые приближения.

2. Уточнение предварительного прогноза с точностью до h^5 . На основе результатов, полученных на первом этапе, вычисляются скорость и перемещение объекта [2]:

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot \frac{(\dot{x}_i + \dot{x}_{i+1})}{2} - \frac{h^2}{10} \cdot (\ddot{x}_{i+1} - \ddot{x}_i) + \frac{h^3}{120} \cdot (\dddot{x}_{i+1} + \dddot{x}_i), \quad (3)$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + h \cdot \frac{(\ddot{x}_i + \ddot{x}_{i+1})}{2} + \frac{h^2}{12} \cdot (\dddot{x}_i - \dddot{x}_{i+1}). \quad (4)$$

Полученные по формулам (3) и (4) значения используются для пересчёта и уточнения значений второй и третьей производных в точке $i + 1$. Вычисленные на данном этапе значения функции, а также её первой, второй и третьей производных представляют собой вторые приближения.

3. Проверка устойчивости найденных значений x_{i+1} , \dot{x}_{i+1} . По формулам (3) и (4) с использованием вторых

приближений определяются перемещение и скорость в точке $i + 1$, представляющие собой третьи приближения. Затем вычисляются абсолютные значения разности вторых и третьих приближений соответственно. Полученные величины разности не должны превысить установленную перед началом вычислений точность. В случае выполнения данного условия третьи приближения используются для следующего шага моделирования. В противном случае следует повторить расчёт с п. 1 для момента t_{i+1} , приняв для повторной итерации шаг $h/2$.

В качестве создаваемой RT-модели была выбрана модель прямолинейного движения одиночного колеса в тормозном режиме (рис. 1) [3]:

$$\begin{cases} J_K \cdot \ddot{\varphi} = -M_T - M_f + R_X \cdot r_d, \\ m_K \cdot \ddot{x} = -R_X, \\ M_f = f \cdot R_Z \cdot r_{KO}, \\ R_X = \mu_K \cdot R_Z, \\ R_Z = m_K \cdot g, \\ \omega_K = \dot{\varphi}, \\ v_K = \dot{x}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} J_K \cdot \dot{\varphi} = R_X \cdot r_d, \\ m_K \cdot \dot{x} = -R_X, \\ \dot{R}_X = R_Z \cdot \mu_K, \\ R_Z = m_K \cdot g. \end{cases} \quad (6)$$

где M_T — тормозной момент колеса, принимается кусочно-постоянной функцией времени; $M_f = const$ — момент сопротивления качению колеса; R_Z — нормальная

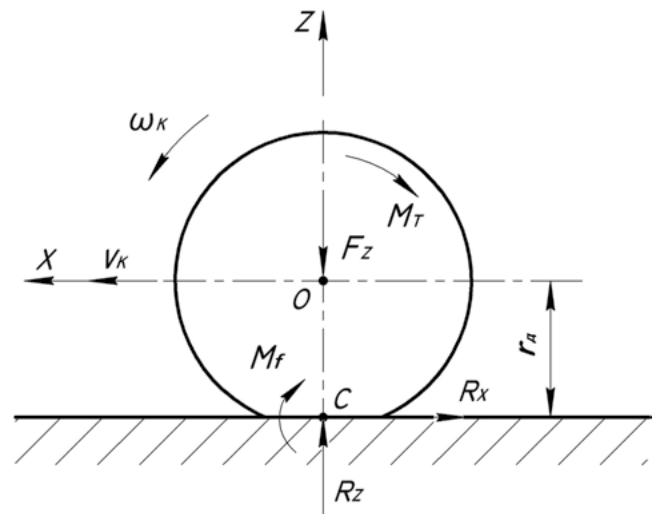


Рисунок 1. Воздействия на тормозящее колесо при неравномерном движении

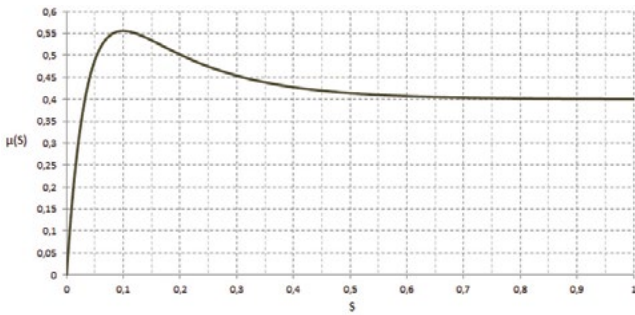


Рисунок 2. $\mu(S)$ -диаграмма исследуемой модели колеса

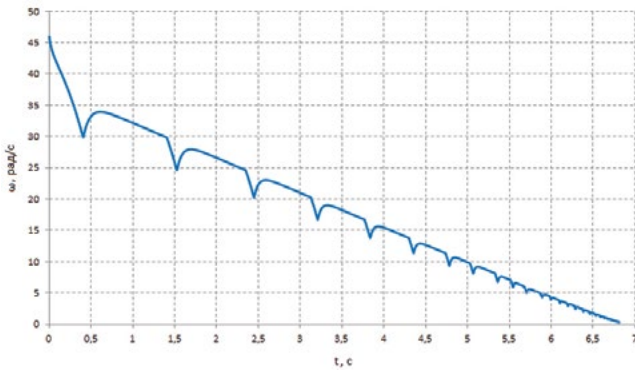


Рисунок 3. Временная зависимость угловой скорости колеса при решении Simulink-модели

реакция на колесо со стороны опорной поверхности; R_x — продольная реакция на колесо со стороны опорной поверхности; f — коэффициент сопротивления качению колеса; m_k — масса колеса; μ_k — коэффициент взаимодействия колеса с опорной поверхностью; r_{k0} — радиус качения колеса без скольжения; r_d — динамический радиус колеса; $r_{k0} \approx r_d = const$; v_k — действительная линейная скорость колеса; ω_k — угловая скорость колеса; J_k — момент инерции колеса.

С учётом допущения о постоянстве $\mu(S)$ -диаграммы для исследуемого нестационарного движения колеса по опорной поверхности величина коэффициента сцепления и его производная по времени определяются следующими выражениями:

$$\mu_k = \mu_{k_MAX} \cdot (1 - \exp(\frac{-S}{0,04})) \cdot (1 + \exp(\frac{-S}{0,15})), \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mu}_k = & \frac{\mu_{k_MAX}}{0,04} \cdot \dot{S} \cdot \exp(\frac{-S}{0,04}) \cdot (1 + \exp(\frac{-S}{0,15})) - \\ & - \frac{\mu_{k_MAX}}{0,15} \cdot \dot{S} \cdot \exp(\frac{-S}{0,15}) \cdot (1 - \exp(\frac{-S}{0,04})). \end{aligned} \quad (8)$$

Параметр S представляет собой коэффициент скольжения колеса относительно опорной поверхности; его величина, а также производная по времени вычисляются следующим образом:

$$S = \frac{v_k - \omega_k \cdot r_{k0}}{v_k}, \quad (9)$$

$$\dot{S} = v_k^{-2} \cdot \left[(v_k \cdot \dot{\omega}_k \cdot r_{k0}) \cdot v_k - (v_k - \omega_k \cdot r_{k0}) \cdot \dot{v}_k \right]. \quad (10)$$

Пусть исследуемая модель колеса в тормозном режиме имеет следующие значения параметров и начальных условий: $m_k = 7\,500$ кг; $M_{T_MAX} = 35\,000$ Н·м; $v_{k0} = 33,3$ м/с; $r_{k0} = r_d = 0,725$ м; $J_k = 300$ кг·м²; $f = 0,07$; $\mu_k = \mu_{k_MAX} = 0,4$ при $S \rightarrow \infty$; $\omega_{k0} = 45,93$ рад/с; $x_0 = 0$; $\varphi_0 = 0$.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента сцепления от величины коэффициента скольжения в соответствии с выражением (7).

В роли системы управления выступает виртуальный контроллер антиблокировочной системы (АБС-контроллер), регулирующий величину прикладываемого тормозного момента. Если тормозной момент превышает максимальный момент по сцеплению, то наблюдается увеличение проскальзывания и вхождение колеса в режим юза. При наступлении указанного условия необходимо снижать величину прикладываемого тормозного момента до тех пор, пока она не станет меньше величины максимального момента по сцеплению [4].

Модель колеса работает в реальном времени, решение соответствующей СДУ осуществляется на базе персонального компьютера (ПК) с установленной операционной системой реального времени (ОСРВ) QNX. Виртуальный АБС-контроллер функционирует на другом ПК, связь между устройствами осуществляется по интерфейсу Ethernet с использованием протокола UDP [5]. На данном этапе указанный протокол выбран ввиду минимального числа используемых устройств в сети и, следовательно, отсутствия необходимости контролировать установление соединения удалённого компьютера с сервером и успешную передачу сообщений, что позволяет значительно сэкономить время, которое является одним из главных критериев работоспособности системы в рамках решаемой задачи.

На первом этапе моделирование движения колеса в тормозном режиме было реализовано в среде MATLAB с использованием пакета расширений Simulink, зависимость угловой скорости колеса от времени представлена на рис. 3. Работа данной модели зависит от производительности ПК, и при абсолютной точности вычисления 10^{-4} на расчёт 5 секунд модельного времени затрачивается менее 1 секунды реального времени.

Затем на языке C++ для решения используемой СДУ был реализован описанный выше численный метод решения. Использование мастерской реального времени MATLAB Real-Time Workshop и расширения Real-Time Workshop Embedded Coder позволяет автоматически генерировать C-код с последующей его загрузкой в контроллер, однако перечень устройств, с которыми может корректно взаимодействовать Real-Time Workshop, ограничен, а программное обеспечение устройства управления гораздо эффективнее поддаётся оптими-

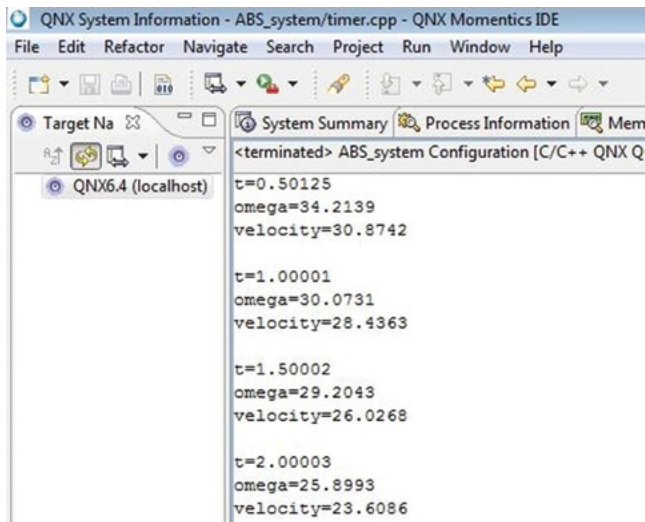


Рисунок 4. Вывод решений СДУ по срабатыванию программного таймера OCPB: t — текущее время движения колеса; ω — текущая угловая скорость колеса; v — текущая линейная скорость колеса

защиты при его разработке вне рамок MATLAB Real-Time Workshop. В качестве среды разработки программы была выбрана платформа SDP Momentics, позволяющая производить отладку исходного кода в OCPB QNX [6]. При задании точности на порядок ниже используемой в Simulink-модели расчётное значение временного шага составило 0,00125 сек. После каждого шага решения осуществляются отправка значения коэффициента скольжения, которое считается известным, виртуальному ABS-контроллеру и получение необходимой величины тормозного момента, используемое на следующем шаге решения. В модели реализована обработка прерываний по программному таймеру OCPB, настроенному на генерацию прерываний каждые 500 мс. На рис. 4 представлены моменты срабатывания указанного устройства с соответствующими им значениями модельного времени и текущими параметрами движения.

Приведённые данные свидетельствует о том, что продолжительность моделирования, определяемая периодом срабатывания таймера, совпадает с текущим временем модели. Указанным фактом подтверждается критерий работоспособности в режиме Real-Time.

По итогам моделирования в реальном времени были осуществлены анализ полученных решений СДУ и их сравнение с результатами поверенной Simulink-модели, решаемой в системном времени. На рис. 5 и 6 представлены зависимости, полученные в Simulink-модели (1) и Real-Time-модели (2).

Сравнительный анализ решений, отмеченных на рис. 6, проведён по десяти точкам, девять из которых соответствуют локальным минимумам и максимумам временных зависимостей.

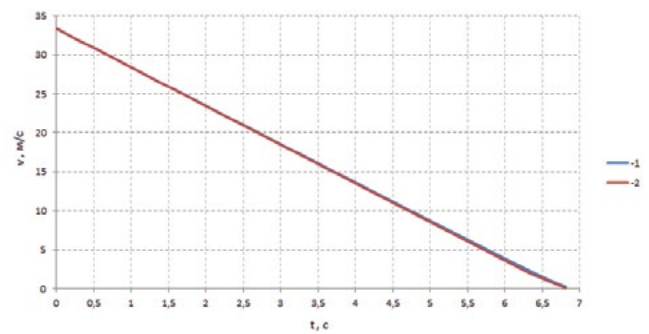


Рисунок 5. Временные зависимости линейной скорости колеса: 1 — зависимость, полученная при решении верифицированной Simulink-модели; 2 — зависимость, полученная при решении модели в Real-Time-режиме

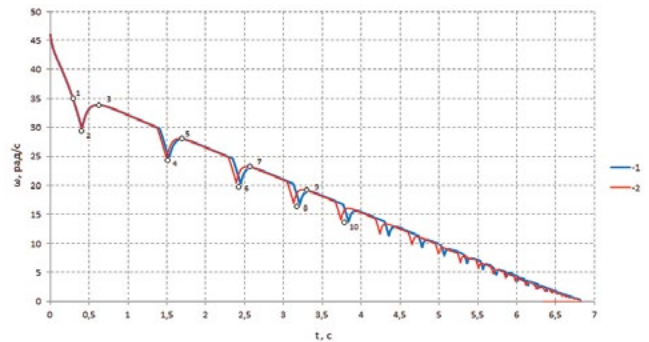


Рисунок 6. Временные зависимости угловой скорости колеса: 1 — зависимость, полученная при решении верифицированной Simulink-модели; 2 — зависимость, полученная при решении модели в Real-Time-режиме

Установлено, что значения угловой скорости колеса в соответствующих точках отличаются не более чем на 2%. Максимальное относительное смещение по времени не превышает 0,131 сек. на всём пути торможения.

Линейная скорость Real-Time-модели (рис. 5) идентична линейной скорости Simulink-модели практически на всём пути торможения (разница не превышает 0,1%), за исключением последнего участка, где наблюдается отличие порядка 1%.

Приведённые результаты показывают, что неявный метод решения СДУ с использованием производных высших порядков может подходить для создания моделей реального времени, отражающих поведение узлов и агрегатов колёсных и гусеничных машин, так как разность результатов моделирования в сравнении с верифицируемой моделью не превышает 10%, а порядок отклонения по времени составляет 0,1 сек.

На основе приведённых данных и полученных результатов сформирована следующая последовательность перехода к моделированию в режиме Real-Time:

- описание исследуемого объекта управления с помощью СДУ;

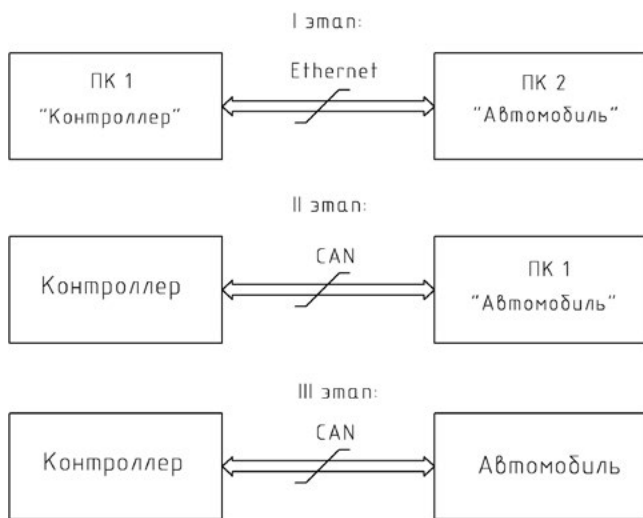


Рисунок 7. Общая последовательность разработки моделей реального времени и последующей отладки программного обеспечения устройств управления

- разработка верифицированной Simulink-модели поведения объекта и получение результатов для сравнения;
- реализация составленной СДУ в среде QNX и определение точности решения на основе приведённого критерия оптимальности;
- сравнение полученных результатов и корректировка Real-Time-модели с целью соответствия поведению реального объекта.

Описанная методика перехода от математических моделей в системном времени к решению тех же моделей в RT-режиме подтверждает себя при работе с виртуальными устройствами и требует дальнейшей проверки с использованием контроллеров управления.

Таким образом, в ходе данного исследования был выполнен первый этап (рис. 7) создания моделей реального времени на основе имитационных математических моделей узлов транспортного средства с применением виртуальной системы управления и виртуального объекта управления.

Следующим этапом методики построения RT-моделей является проверка работоспособности при взаимодействии с устройством управления (этап II, рис. 7). В качестве управляющей системы будет использован блок рулевого управления, включающий контроллер рулевого управления, электроусилитель рулевого механизма и датчик текущего положения сошки рулевого механизма. RT-моделью будет являться модель криволинейного движения автомобиля. Успешное взаимодействие и адекватная реакция указанной модели на управляющие воздействия внешнего устройства позволят осуществить предварительную отладку про-

граммного обеспечения (ПО) контроллера. На третьем этапе контроллер рулевого управления с промежуточным вариантом исходного кода планируется установить на автомобиль (этап III, рис. 7) с целью получения окончательной версии ПО и, как следствие, определения несоответствий при работе с реальным объектом управления и RT-моделью. Выявленные различия будут использованы при корректировке RT-модели с целью максимального приближения её поведения к поведению реального объекта, а также для общей оценки разрабатываемого подхода к созданию моделей реального времени, что позволит в будущем значительно снизить сроки разработки и проведения испытаний БИУС колёсных и гусеничных машин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 9905/17/07-к-12 между ОАО «КамАЗ» и Московским государственным техническим университетом им. Н. Э. Баумана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Котиев Г. О. Метод прогнозирования нагруженности элементов системы поддрессоривания транспортных гусеничных машин: дис. ... канд. техн. наук. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1993. — 132 с.
2. Демидович Б. П., Марон И. А., Шувалова Э. З. Численные методы анализа / под ред. Д. П. Демидовича. — 3-е изд., перераб. — М.: Наука, 1967. — 368 с.
3. Тарасик В. П. Теория движения автомобиля: учебник для вузов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 478 с.
4. Проектирование полноприводных колёсных машин: учебник для вузов: в 3 т. / Б. А. Афанасьев, Б. Н. Белоусов, Л. Ф. Жеглов и др. / под ред. А. А. Полуняна. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — Т. 3. — 432 с.
5. Стивенс У. Р., Феннер Б., Рудофф Э. М. Unix: разработка сетевых приложений. — 3-е изд. — СПб.: Питер, 2007. — 1 039 с.
6. Кертен Р. Введение в QNX Neutrino 2: руководство по программированию приложений реального времени в QNX Realtime Platform. — СПб.: Петрополис, 2001. — 514 с.