

conditions of the uncontrollable change of its parameters and shaft load. Therefore, the aim is construction and investigation of the adaptive control laws, and designing on its basis of an appropriate structure available for use of the traditional PID controller platform, and also the synthesis of its parameters determining the desired static and dynamic properties of the projected electric drive. The authors present a statement and a solution to this problem. They demonstrate that the designed adaptive control law can be implemented on a conventional PID controller platform. At the same time, a traditional PID controller is converted into an adaptive one simply by changing of the parameter of its tuning with a constant element structure including integrator, differentiator and amplifiers. The results are presented using the construction of the adaptive electric drive with the use of the virtual units of the power electronic elements and electric DC motors included into SIMULINK library.

Keywords: adaptation, gradient method, control law, local optimization, adaptive controller, PID controller, electric drive

For citation:

Krasnodubets L. A., Oleynikov A. M. PID Controller as a Platform for Implementation of the Adaptive Laws of the Electric Drive Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 809–816.

DOI: 10.17587/mau.17.809-816

References

1. Krut'ko P. D. Novye tehnologii analiticheskogo proektirovaniya algoritmicheskogo obespecheniya sistem upravleniya dvizheniem (New technologies of analytical designing the algorithmic support of the system of movement control), *Upravlenie, avtomatizatsiya i okruzhayushchaya sreda: Materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf., 8–13 sentyabrya 2008*, Sevastopol, Publishing House of SevNTU, 2008, pp. 4–24 (in Russian).
2. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers, *Trans. ASME*, 1942, Vol. 64, pp. 759–768.
3. Choi, Y., and Chung, W. K. PID Trajectory Tracking Control for Mechanical Systems, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Springer, 2004, 108 p.

4. Johnson M. A. and Mohammad H. Moradi M. H. PID control: new identification and design methods, Springer, 2005, 543 p.
5. Visioli A. Practical PID Control, *Advances in Industrial Control*. Springer, 2006. 310 p.
6. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* (Nonlinear and adaptive control of complex dynamic systems), Pod Red. G. A. Leonova i A. L. Fradkova., SPb., Nauka, 2000, 549 p. (in Russian).
7. Frolov Ju. M. *Adaptivnaya sistema s samonastroykoj parametrov* (Adaptive system with an auto tuning of parameters), *Elektrotehnicheskie Kompleksy i Sistemy Upravleniya*, 2008, no. 4, pp. 29–31. (in Russian).
8. Antonov V. N., Terehov V. A., Tjukin I. Ju. *Adaptivnoe upravlenie v tehnikeskikh sistemah* (Adaptive control in technical systems), SPb., Publishing House of S. Peterburgskiy universitet, 2001, 244 p. (in Russian).
9. Krasnodubets L. A. Terminal control in sea observation systems with mobile platforms for data collection, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, vol. 47, no. 2, pp. 296–307.
10. German-Galkin S. G. MATLAB & SIMULINK. Proektirovanie mehatronnykh sistem na PK (Designing mechatronic systems on the PC), SPb., Korona — Vek, 2008, 368 p. (in Russian).

УДК 004.451.1, 004.032.324

DOI:10.17587/mau.17.816-820

Ю. А. Холопов, вед. инж.,

Институт точной механики и вычислительной техники им. С. А. Лебедева

Российской академии наук, Москва,

Ле Ба Чунг, аспирант, chungbaumanvietnam@gmail.com, Нгуен Тхань Чунг, аспирант,

Московский физико-технический институт (ГУ), Долгопрудный

Согласованная информационная среда для высокодинамичной системы управления

Рассмотрен вопрос рациональной организации операций ввода—вывода для высокодинамичной цифровой системы управления (ЦСУ). Требуемая динамика ЦСУ достигнута за счет вынесения операций ввода—вывода в отдельный аппаратный узел — активную периферийную подсистему. Разработанная модель согласованной информационной среды для ЦСУ позволяет точнее оценивать длительности всех фаз цикла регулирования и упрощает логику взаимодействия частей программного обеспечения цикла управления.

Ключевые слова: высокодинамичная система управления, активная периферийная подсистема, модель согласованной информационной среды, периферийные устройства

Введение

Современные цифровые системы управления (ЦСУ) представляют собой иерархические информационные структуры, элементами которых являются вычислители, слабозависимые составные части объекта управления (ОУ), датчики (Д), исполнительные устройства (ИУ) и совокупность информационных связей узлов — сеть.

Предыдущие поколения систем управления строились на основе аналоговых узлов. С ростом вычислительной мощности и увеличением объема памяти микропроцессоров (МП) появилась воз-

можность использования их как активных элементов в цифровых системах управления. Класс задач управления, который решается с помощью микропроцессоров, достаточно широк и по сложности объектов управления, и по их динамике.

Параллельно с ростом функциональных возможностей микропроцессоров росли ожидания по улучшению качества управления, в том числе — высокодинамичными объектами, ведь со времени начала использования МП в цифровых системах управления их тактовая частота и объем адресуемой памяти увеличились больше чем в 1000 раз [1].

Но столь же существенного скачка в качестве управления высокодинамичными объектами не произошло. Логично предположить, что причина этого кроется не в свойствах программно управляемого ядра МП, а в способе подготовки данных и организации вычислений в единой информационной среде цифровой системы управления.

Программно управляемое ядро — самый быстрый узел микропроцессора, скорость которого традиционно рассматривается как основная характеристика, определяющая динамику системы управления. Следующий элемент микропроцессора, влияющий на скорость исполнения задач управления, — система интерфейсов с периферийными устройствами [2]. Широко используемое в настоящее время программное управление интерфейсами ввода—вывода не рационально, так как с помощью программно управляемых ядер сложно анализировать и синтезировать временные интервалы, а работа с интерфейсами (т.е. с периферийными устройствами) как раз происходит во временной области. Поэтому перенос функции управления интерфейсами в отдельную аппаратуру, по нашему мнению, позволит решить задачу быстрого управления периферийными устройствами. Чтобы соответствовать новым скоростным параметрам периферийной подсистемы, другого решения потребует реализация функции обмена данными между ней и программно управляемым ядром.

Отсутствие рациональной методики комплексирования разнообразных периферийных устройств в высокодинамичных цифровых системах управления затрудняет достижение нужного масштаба реального времени в системах управления все более сложными объектами, с постоянно увеличивающимся числом периферийных устройств. Поэтому основное внимание в работе будет уделено возможности построения подсистемы ввода—вывода как единого типового узла центрального вычислителя ЦСУ. Как будет показано ниже, выделение подсистемы ввода—вывода в отдельный, автономно работающий узел, позволяет упростить программную обработку в цикле управления и при той же вычислительной мощности микропроцессора повысить качество и динамику системы управления.

Далее проведем анализ информационных процессов в цифровых системах управления.

Общая структура систем управления

Современные системы управления могут сочетать в себе не только механические, но и электрические, оптические и т.п. элементы. Сложность систем управления увеличивается не только статически, с точки зрения структуры и физических связей, но и динамически, в смысле поведения систем во времени [3].

Рассмотрим обобщенную структуру замкнутой цифровой системы управления (рис. 1).

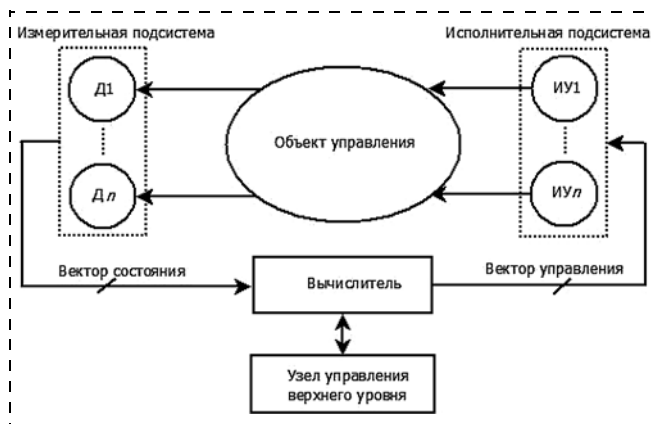


Рис. 1. Обобщенная структурная схема замкнутой системы управления

От набора датчиков ($D_1...D_n$) после аналого-цифрового преобразования в память вычислителя доставляются данные о состоянии объекта управления — вектор состояния. На основе модели объекта управления и уставок от узла управления верхнего уровня вычислитель рассчитывает управляющие воздействия — вектор управления — и пересылает его компоненты исполнительным устройствам ($IУ_1...IУ_n$), осуществляющим воздействия на объект управления. Описанная последовательность событий замыкания обратной связи контура регулирования ЦСУ составляет цикл управления. Длительность цикла замкнутой ЦСУ задается разработчиком системы управления объектом и определяется в большей степени динамикой объекта управления.

Фазы цикла регулирования цифровой системы управления

Периодичность информационных процессов в цифровой системе управления иллюстрирует рис. 2.

В каждом цикле управления можно различить пять фаз:

- ✓ измерения (измерительная фаза или фаза ввода параметров, в которой происходит фиксация состояния объекта управления в сенсорах, преобразование аналоговых параметров в цифровые коды — вектор состояния);
- ✓ передачи вектора состояния в память центрального вычислителя цифровой системы управления;
- ✓ расчета (вычисление управляющих воздействий на объект управления);
- ✓ выдачи вектора управления на исполнительные устройства;
- ✓ обработки новых управляющих воздействий, ожидания реакций объекта управления перед началом следующего цикла управления.

Вышеперечисленные фазы повторяются в каждом цикле управления с постоянным периодом — периодом регулирования. Обратим внимание на то, что для расчета управляющих сигналов в памяти вычислителя должны быть размещены параметры текущего состояния объекта, т.е. в каждом цикле

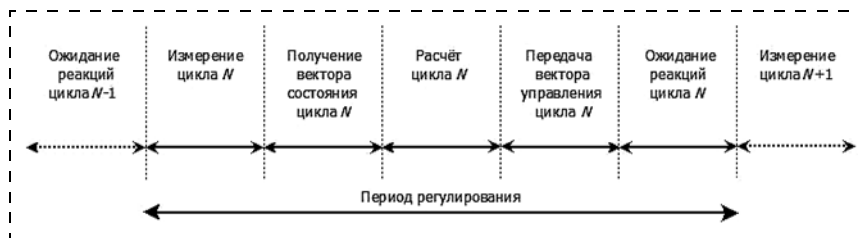


Рис. 2. Фазы циклов регулирования систем управления

управления вычислитель должен опросить все датчики. Аналогично, в каждом цикле управления нужно обновлять уставки для большей части исполнительных устройств.

Следующий цикл управления логично начинать после отработки объектом предыдущего управляющего воздействия, поэтому имеет место существенная задержка между окончанием выдачи уставок на ИУ и началом измерительной фазы следующего цикла управления [4].

При проектировании цифровых систем управления стремятся уменьшить длительности всех фаз, кроме последней, чтобы уменьшить фазовые искажения. Это особенно актуально при построении ЦСУ с максимально высокой частотой цикла управления объектом.

Особенности информационных процессов в цифровой системе управления

Перечислим некоторые основные характеристики информационных процессов в цифровой системе управления:

- ✓ работа в режиме реального времени, с заданным временем реакции на совокупность входных событий;
- ✓ цикличность информационных процессов;
- ✓ статичность набора компонент векторов состояния и управления.

События в цифровой системе управления носят упорядоченный, циклический характер [5]. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность перехода от асинхронной модели организации вычислений к частично синхронной. Синхронный характер можно придать функции периодического ввода и вывода параметров между памятью вычислителя и периферийными устройствами. Функции ввода и вывода данных можно перенести на отдельный узел, который будет формировать измеряемые параметры как вектор состояния объекта и передавать этот вектор в память вычислителя, и также получать вектор управления от вычислителя и раздавать его компоненты исполнительным устройствам.

Контур регулирования в цифровой системе управления

Система управления сложными объектами представляет собой иерархическую совокупность контуров регулирования по степеням свободы объекта управления, причем масштаб реального времени ЦСУ

определяется скоростью работы контуров регулирования нижнего уровня (КРНУ).

Фактически, схема любого контура регулирования повторяет обобщенную структуру ЦСУ. Наличие в цифровой системе управления нескольких контуров регулирования вызывает необходимость решения задач: приема вектора состояния, расчета, выдачи сигналов управления во

всех контурах регулирования за один цикл управления. Общепринятой является модель поконтурного обсчета функций управления степенями свободы объекта. При аппаратной реализации общих для всех КРНУ функций взаимодействия с периферией рационально и остальные, однотипные фазы работы контуров регулирования объединить в единые — групповые — функции обработки.

Рассмотрим систему управления, в которой к объекту управления подключено несколько датчиков. При организации вычислений в асинхронной манере перед расчетом вычислителю необходимо последовательно опросить датчики для получения параметров состояния объекта. Как правило, датчики не являются активными устройствами, и измерение параметра начинается после запуска работы центральным вычислителем. Время готовности измеренных параметров в основном определяется скоростью работы датчиков, имеющих разные структуры и задержки аналого-цифрового преобразования.

Вместе с тем, последовательное обращение вычислителя к датчикам в большей или меньшей степени вносит рассогласование в фазы их прочтения. Выделение функции опроса датчиков в отдельный аппаратный узел позволит исключить фазовые искажения при измерении состояния объекта управления.

Для выработки управляющего воздействия по одной степени свободы объекта управления вычислитель использует только часть параметров состояния. Данные от соответствующих датчиков размещаются в памяти вычислителя с использованием механизма аппаратных прерываний. Для передачи каждого параметра объемом в 1...2 байта используется отдельное прерывание. Таким образом, для вычисления одного параметра управления необходимо обработать в среднем 3...4 прерывания.

При обработке каждого прерывания выполняется известная последовательность действий:

- ✓ восприятие запроса на прерывание;
- ✓ запоминание состояния прерванного процесса;
- ✓ передача управления задаче обработки прерывания;
- ✓ обработка прерывания, запись измеренных параметров в память;
- ✓ восстановление прерванной задачи.

Общие затраты времени на обработку каждого прерывания оказываются весьма заметными, поэтому одиночные операции ввода данных по прерываниям приводят к нерациональному расходу счетного ресурса микропроцессора. Аналогичная

картина имеет место в ходе процесса выдачи уставок. На универсальном микропроцессоре такие одиночные операции используются для разовых асинхронных взаимодействий, когда точно неизвестно, в какой момент то или иное взаимодействие произойдет, и неизвестно их число.

В системе управления события взаимодействия с периферийным окружением не случайны, все они заранее predetermined. Аппаратный состав периферийных устройств системы управления статичен, т.е. в системе заранее известен перечень датчиков и исполнительных устройств. Неизменный набор переменных ввода—вывода и цикличность работы системы управления позволяют перейти от одиночных операций ввода—вывода на групповые, циклические. Аппаратная реализация операций ввода—вывода в циклических автоматах позволяет реализовать функцию синхронной, одновременной фиксации состояния всех датчиков в текущем цикле регулирования — получение "мгновенного снимка" состояния объекта управления. Стабильность фазовых задержек в такой реализации позволяет передать состояние ОУ в расчетную подсистему с минимальными временными искажениями.

Надо отметить, что в отличие от ситуации с "мгновенным снимком" состояния объекта управления одновременная выдача уставок и их отработка могут приводить к возникновению критических режимов в системе управления, а именно, к большой пиковой нагрузке на источник энергии. Проблемы можно избежать, если для каждого исполнительного устройства заранее рассчитать необходимую для отработки уставки энергию и передавать уставки исполнительным устройствам не одновременно, а со сдвигами по фазе (учитывая ограничения по максимальной мощности локального источника энергии). Такая дисциплина отработки уставок будет нагружать источник энергии равномерно, без кратковременных перегрузок. Именно аппаратная реализация позволяет легко и точно реализовать заданные сдвиги по фазе при отработке уставок.

Модель согласованной информационной среды для цифровых систем управления

На основе проведенного анализа разработана модель согласованной информационной среды для ЦСУ (рис. 3). Согласно этой модели функция управления периферийными устройствами выносится в отдельный аппаратный узел — активную периферийную подсистему. Вычислитель освобождается от непрофильной для него задачи программного управления периферийными устройствами и теперь занимается только расчетом управляющих воздействий и связью с узлом управления верхнего уровня.

Память, используемая для хранения параметров состояния и управления, имеет два порта доступа. Один из них включен в адресное пространство центрального вычислителя. Память работает на скорости системной памяти вычислителя [6, 7].

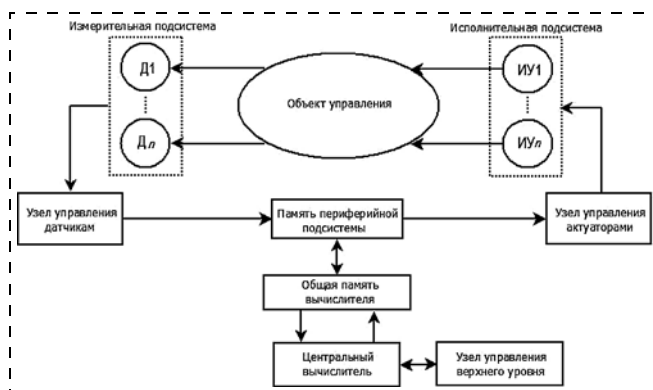


Рис. 3. Модель согласованной информационной среды для цифровых систем управления

Все узлы системы управления работают по фиксированному, заранее сформированному расписанию. Отсутствие асинхронности во взаимодействии с периферийными устройствами позволяет упростить адресацию абонентов и исключить конфликты в коммуникационной среде цифровой системы управления. Вынесение операций ввода—вывода в отдельный, автономно работающий узел, позволяет ускорить все выше перечисленные фазы и исключить взаимовлияние между ними.

Отметим некоторые характеристики разработанной модели согласованной информационной среды для ЦСУ:

- ✓ мгновенный снимок — одновременная фиксация всех параметров состояния объекта управления;
- ✓ бесконфликтная коммуникационная среда передачи данных с минимальными задержками в канале связи;
- ✓ групповой обмен данными с центральным вычислителем с использованием контрольного кода пакета;
- ✓ доступность для обработки всех параметров состояния объекта управления одновременно;
- ✓ возможность распараллеливания обработки на нескольких ядрах.

Выводы

В предлагаемой модели согласованной информационной среды для ЦСУ общее быстродействие системы достигнуто за счет выделения в отдельные аппаратные подсистемы и раздельной обработки фаз: ввода, расчета и вывода. Организация ввода—вывода данных простыми, циклическими операциями в бесконфликтном режиме позволяет максимально увеличить скорость выполнения каждой из этих фаз.

Предлагаемый способ организации информационной среды для ЦСУ освобождает микропроцессор от непрофильных для него действий — функций программно управляемого обмена данными с периферийными устройствами. Освобожденный от операций ввода—вывода счетный ресурс МП

может использоваться для других целей, например, для уточнения модели объекта управления.

Модель согласованной организации вычислений для ЦСУ позволяет точнее оценивать длительности фаз цикла регулирования, так как все фазы, кроме расчетной, реализованы аппаратно. В расчетной же фазе элементы асинхронной модели организации вычислений минимизированы благодаря отсутствию фоновых, программно-управляемых операций ввода—вывода. Также упрощается логика взаимодействия частей программного обеспечения цикла управления, что должно облегчить процессы разработки и отладки системы управления.

Список литературы

1. **Суворов Д. Н.** Структура и устройство микропроцессорных систем управления: учеб. для вузов. М.: МАДИ, 1998. С. 23—86.

2. **Павлов В. А.** Интерфейсы периферийных устройств: учеб. для вузов. Саров: СарФТИ, 2010. С. 78—98.

3. **Чан Ван Хань.** Исследование и разработка перспективных методов оптимизации бортовых распределенных систем управления реального времени // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 9 (28). С. 56—59.

4. **Ле Ба Чунг.** Способ подключения периферийных устройств к системе управления через интерфейс USB 2.0 // Интеллектуальные системы. Научные труды одиннадцатого международного симпозиума. М.: РУДН, 2014. С. 118—122.

5. **Холопов Ю. А., Преображенский Н. Б.** Циклическое цифровое управление // Международный Научный Институт "Educatio". Ежемесячный научный журнал. Часть 3. Технические науки. 2014. № 7. С. 39—41.

6. **Кожин А. С., Сахин Ю. Х.** Коммутация соединений процессорных ядер с общим кэшем третьего уровня микропроцессора "Эльбрус — 4С+" // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2013. № 3. 11 с.

7. **Шербина Н. А.** Системный коммутатор для микропроцессора "МЦСТ — 4R" // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2010. № 3. 12 с.

Consistent Information Environment for a Highly Dynamic Control System

Ju. A. Holopov, Lebedev Institute of Precision Mechanics and Computer Engineering,
Moscow, 119992, Russian Federation,

Le Ba Chung, chungbaumanvietnam@gmail.com✉, **Nguyen Thanh Trung**,
Moscow Institute of Physics and Technology (State University),
Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation

Corresponding author: **Chung Le Ba**, Ph. D. Student,
e-mail: chungbaumanvietnam@gmail.com

Received on May 25, 2016

Accepted on June 23, 2016

The article discusses the question of a rational organization of the input — output operations for a highly dynamic digital control system (DCS). The required dynamics of DCS is achieved through a transfer of the input — output operations into a separate hardware node — an active peripheral subsystem. The developed model of the consistent information environment for DCS allows a more precise evaluation of all the phase durations of the control cycle and simplifies the logic of interaction between the parts of the software management cycle. Organization of the input — output data with simple cyclic operations in a non-conflict mode allows us to maximize the speed of operation in all the phases. Another advantage of the architecture of the input-output subsystem is the ability to simultaneously capture the state of all sensors in the current cycle regulation — getting a "snapshot" of the state of the controlled object. This result also demonstrates a rational improvement of the overall performance of all the operations of the exchanges with the periphery, but not of the speed of operation of the individual transactions with in one control cycle.

Keywords: highly dynamic control system, active peripheral subsystem, model of the consistent information environment, peripherals

For citation:

Holopov Ju. A., Le Ba Chung, Nguyen Thanh Trung. Consistent Information Environment for a Highly Dynamic Control System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 816—820.

DOI: 10.17587/mau.17.816-820

References

1. **Suvorov D. N.** *Struktura i ustrojstvo mikroprocessornyh sistem upravleniya: ucheb. dlja vuzov* (The structure and device of microprocessor control systems: textbook for higher education institutions), Moscow, Publishing house of MADI, 1998, pp. 23—86 (in Russian).

2. **Pavlov V. A.** *Interfejsy periferijnyh ustroystv: ucheb. dlja vuzov* (Interfaces of peripheral devices: textbook for higher education institutions), Sarov, SarFTI, 2010, pp. 78—98 (in Russian).

3. **Tran Van Khanh.** *Issledovanie i razrabotka perspektivnyh metodov optimizacii bortovyh raspredelennyh sistem upravleniya real'nogo vremeni* (Research and development of advanced optimization methods for on-Board distributed control systems for real-time),

Mezhdunarodnyj Nauchno-Issledovatel'skij Zhurnal, 2014, no. 9 (28), pp. 56—59 (in Russian).

4. **Le Ba Chung.** *Sposob podkljuchenija periferijnyh ustroystv k sisteme upravleniya cherez interfejs USB 2.0* (The method of connecting peripheral devices to the control system via USB 2.0 interface), *Sbornik "Intellektual'nye sistemy. Nauchnye trudy odinnadcatogo mezhdunarodnogo simpoziuma"*, Moscow, Publishing house of RUDN, 2014, pp. 118—122 (in Russian).

5. **Holopov Ju. A., Preobrazhenskij N. B.** *Ciklicheskoje cifrovoe upravlenie* (Cyclic digital control), *Mezhdunarodnyj Nauchnyj Institut "Educatio"*, *Ezhemesjachnyj Nauchnyj Zhurnal. Chast' 3. Tehnicheskie Nauki*, 2014, no. 7, pp. 39—41 (in Russian).

6. **Kozhin A. S., Sahin Ju. H.** *Kommutacija soedinenij processornyh jader s obshhim kjeshem tret'ego urovnja mikroprocessora "Elbrus — 4S+"* (Switching the connections of the processor cores with the shared cache of the third level of the microprocessor "Elbrus — 4C+"), *Voprosy Radioelektroniki. Ser. JeVT*, 2013, no. 3, 11 pp. (in Russian).

7. **Shherbina N. A.** *Sistemnyj kommutator dlja mikroprocessora "MCST — 4R"* (The system switch for microprocessor "MCST — 4R"), *Voprosy Radioelektroniki. Ser. JeVT*, 2010, no. 3, 12 pp. (in Russian).