

УДК 539.374

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-218-226

Для цитирования: Постановка задачи оптимизации структуры аппаратно-программного комплекса системы управления реального времени / С. Н. Ефимов, В. А. Терсков, О. Ю. Серикова, А. В. Попова // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 218–226. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-218-226.

For citation: Efimov S. N., Terskov V. A., Serikova O. Y., Popova A. V. Statement of the problem of optimization of the structure information processing computer appliances for real-time control systems. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 218–226. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-218-226.

Постановка задачи оптимизации структуры аппаратно-программного комплекса системы управления реального времени

С. Н. Ефимов^{1*}, В. А. Терсков¹, О. Ю. Серикова², А. В. Попова¹

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

²Красноярский институт железнодорожного транспорта –
филиал Иркутского государственного университета путей сообщения
Российская Федерация, 660028, г. Красноярск, ул. Новая Заря, 2

*E-mail: efimov@bk.ru

В статье приведена постановка задачи оптимизации структуры аппаратно-программных комплексов, предназначенных для систем управления реального времени, применяемых, в том числе, в ракетно-космической отрасли. Кроме того, изучены особенности данной задачи, влияющие на выбор методов оптимизации. Делается вывод, что данная задача может быть эффективно решена с использованием эволюционных методов оптимизации.

Существующие модели производительности позволяют определять минимальную аппаратную конфигурацию многопроцессорного вычислительного комплекса. Предложенный в данной статье подход позволяет находить конфигурации, обладающие аппаратной избыточностью (по сравнению с минимальной конфигурацией), но, за счёт этого, имеющие большую вероятность нахождения в состояниях, обеспечивающих производительность, достаточную для достижения целей функционирования проектируемой системы управления реального времени. Описанный подход является более гибким, чем простое дублирование всех аппаратных компонентов минимальной конфигурации, что может быть использовано для уменьшения затрат на создание и эксплуатацию проектируемой системы управления.

Предложенная модель может быть использована для оптимизации производительности многопроцессорных аппаратно-программных комплексов систем управления реального времени. При этом нужно учитывать, что ресурсы, выделенные на создание и эксплуатацию аппаратно-программного комплекса, всегда ограничены. Поэтому целесообразно рассматривать задачу оптимизации производительности как многокритериальную: одним критерием будет производительность, а другим – затраты на создание аппаратно-программного комплекса.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, модель, производительность, системы управления реального времени, теория массового обслуживания.

Statement of the problem of optimization of the structure information processing computer appliances for real-time control systems

S. N. Efimov^{1*}, V. A. Terskov¹, O. Y. Serikova², A. V. Popova¹

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, branch of the Irkutsk State University of Communications
2, Novaya Zarya St., Krasnoyarsk, 660028, Russian Federation

*E-mail: efimov@bk.ru

The article presents the problem of optimizing the structure of information processing computer appliances for real-time control systems used, among other things, in the rocket and space industry. In addition, the features of this problem that affect the choice of optimization methods are studied. It's concluded that this problem can be effectively solved using evolutionary optimization methods.

Existing performance models allow you to determine the minimum hardware configuration of a multiprocessor computing system. The approach proposed in this article allows us to find configurations that have hardware redundancy (compared to the minimum configuration), but, due to this, have a greater probability of being in states that provide performance sufficient to achieve the goals of functioning of the designed real-time control system. The described approach is more flexible than simply duplicating all hardware components of the minimum configuration, which can be used to reduce the cost of creating and operating the designed control system.

The proposed model can be used to optimize the performance of multiprocessor hardware and software complexes of real-time control systems. At the same time, it should be taken into account that the resources allocated for the creation and operation of the hardware and software complex are always limited. Therefore, it is advisable to consider the problem of performance optimization as a multi-criterion: one criterion will be performance, and the other-the cost of creating a hardware and software complex.

Keywords: Computer appliance, model, performance, real-time system, queuing theory.

Введение

Система реального времени (СРВ) – это аппаратно-программный комплекс (АПК), который решает задачи управления различными процессами в условиях временных ограничений.

Многие современные системы управления являются системами реального времени, для которых производительность является критически важным параметром: управляющее воздействие должно быть выработано за требуемое время, иначе оно становится бесполезным. К этому классу систем управления можно отнести, например, системы управления, применяемые в ракетно-космической отрасли, системы управления воздушным движением или системы управления технологическими процессами [1; 2].

Подобные системы управления представляют собой аппаратно-программные комплексы, т. е. совокупность аппаратных средств и программного обеспечения, совместно функционирующих для выполнения поставленной задачи.

Требования к производительности вычислительных систем, используемых в системах управления реального времени, постоянно возрастают из-за усложнения объектов управления.

Повышение быстродействия вычислительной техники традиционно шло двумя путями: повышение тактовой частоты процессоров и разработка многопроцессорных систем. На сегодняшний день можно констатировать, что возможности повышения тактовой частоты исчерпаны, что обусловлено физическими ограничениями [3]. Это означает, что системы управления

реального времени неизбежно будут создаваться на основе многопроцессорных вычислительных систем.

Важно понимать, что требования к производительности аппаратного обеспечения систем управления реальным временем определяются программным обеспечением (ПО), которое используется для выработки управляющего воздействия. К программному обеспечению систем управления реальным временем также предъявляются особые требования, связанные с необходимостью гарантированного получения корректного управляющего воздействия за строго определенное время. Поэтому производительность многопроцессорных вычислительных систем целесообразно изучать в неразрывной связи с функционированием программного обеспечения.

Для проектирования многопроцессорных аппаратно-программных комплексов нужна модель их производительности, которая бы позволила определять быстродействие вариантов архитектуры без экспериментирования, которое может быть крайне длительным и требовать существенных затрат.

Существующие модели производительности многопроцессорных вычислительных систем [4–6] не учитывают возможность отказов аппаратного обеспечения и его восстановления. На практике при проектировании аппаратно-программных комплексов систем управления реальным временем этот аспект нельзя игнорировать, так как уменьшение производительности из-за выхода одного из процессоров из строя может привести к невозможности выработки управляющего воздействия за требуемое время, что для систем реального времени является неприемлемым.

Модель производительности и постановка задачи оптимизации

Рассмотрим более общую модель производительности, включающую дополнительные состояния, в которых не все процессоры и шины являются исправными, а также переходы между состояниями, соответствующими выходам процессоров и шин из строя, а также восстановлению их работоспособности. Вычислительная система рассматривается как система массового обслуживания (СМО).

Исследуемый АПК состоит из N типов процессоров, содержащих по M_i ($i = 1, 2, \dots, N$) процессоров каждого типа со средним временем выполнения одной команды T_{0i} . Процессоры объединяются с оперативной памятью посредством N_1 шин. Время обслуживания запроса от процессора i -го типа равно τ_i . Предполагается, что интервал времени между двумя любыми смежными заявками подчиняется пуассоновскому закону распределения с параметром ν_i . Суммарный поток отказов от процессоров всех типов и шин интерфейса подчиняется так же пуассоновскому закону распределения с параметром λ_i . Кроме того, при оценке производительности вычислительной системы полагают, что интервал времени между двумя смежными обслуживаниями подчиняется экспоненциальному закону распределения с параметром μ_i , а время восстановления шин и процессоров i -го типа – экспоненциальному закону с параметром ξ_i .

Состояния, в которых может находиться рассматриваемая система, обозначим как $a_{n, m_1, m_2, \dots, m_N, j_1, j_2, \dots, j_N}^{k, l}$. При этом $(N_1 - n)$ шин интерфейса исправны и участвуют в вычислительном процессе, а n неисправны и восстанавливаются, $(M_1 - m_1)$ процессоров первого типа исправны и участвуют в вычислительном процессе, а m_1 неисправны и восстанавливаются, $(M_2 - m_2)$ процессоров второго типа исправны и участвуют в вычислительном процессе, а m_2 неисправны и восстанавливаются, ..., $(M_N - m_N)$ процессоров N -го типа исправны и участвуют в вычислительном процессе, а m_N неисправны и восстанавливаются. В системе находятся j_1 запросов от процессоров первого типа, j_2 запросов от процессоров второго типа, ..., j_N запросов

от процессоров N -го типа, k шин занято обслуживанием, а l запросов находятся в очередях на обслуживание.

В силу ординарности потоков обращений к памяти, обслуживания процессоров памятью, выходов из строя и восстановления компонентов аппаратного обеспечения переходы возможны только между состояниями, которые отличаются значением только одного индекса, причём этот индекс может либо увеличиться, либо уменьшиться на единицу.

Составляя систему уравнений Колмогорова–Чепмана [7] по общим правилам для систем массового обслуживания, получим систему линейных дифференциальных уравнений для вероятностей состояний, в которых может находиться система.

Приравнявая в этой системе производные нулю, получим систему линейных алгебраических уравнений для вероятностей состояний в стационарном режиме.

Решая систему одним из численных методов линейной алгебры, получим значения вероятностей различных состояний, которые могут быть использованы для определения любых характеристик производительности анализируемой системы [8].

Для того чтобы отказы элементов программного обеспечения можно было считать статистически независимыми, подобно отказам различных экземпляров аппаратуры, эти элементы должны быть разработаны независимо [9]. Такой подход к разработке критически важного программного обеспечения называется мультиверсионным программированием (*N-version programming*) [10]. Легко понять, что производительность программного обеспечения, разработанного с использованием данного подхода, возрастает с увеличением количества различных версий и повышением производительности среды их исполнения [11].

Очевидно, что за счёт увеличения количества дублирующих компонентов аппаратного и программного обеспечения производительность системы может быть доведена до любого заданного уровня [12]. Однако такие системы могут оказаться слишком дорогими в разработке и/или эксплуатации. Поэтому модели производительности должны быть дополнены моделями стоимости.

Стоимость создания аппаратного обеспечения сводится к суммированию стоимости компонентов. Модели оценки затрат на создание отказоустойчивого программного обеспечения учитывают затраты на разработку мультиверсионного ПО, трудозатраты персонала, занятого на различных этапах жизненного цикла программного обеспечения и т. п. [13; 14].

Построенные модели позволяют перейти к формализации задачи выбора оптимальных вариантов архитектуры многопроцессорных аппаратно-программных комплексов систем управления реального времени. При этом очевидны две группы критериев:

- критерии производительности, которые должны быть максимизированы (вероятность нахождения в состоянии, в котором производительность достаточна для выработки управляющего воздействия и т. п.);
- критерии стоимости, которые должны быть минимизированы (стоимость системы, стоимость разработки системы, стоимость эксплуатации, стоимость ремонта и т. д.).

При этом на переменные задачи будут наложены ограничения, например, по энергопотреблению, скорости и т. д. Для упрощения задачи критерии стоимости можно перевести в ограничения, так как для всех стоимостных характеристик системы, как правило, имеются верхние границы, заданные заказчиком системы управления. Выделив среди критериев производительности ведущий, получим задачу однокритериальной условной оптимизации с набором существенных ограничений, в которые перейдут остальные критерии. Кроме того, будет иметься набор естественных ограничений (например, количество компонентов аппаратного обеспечения является целочисленным и положительным).

Рассмотрим тип переменных нашей оптимизационной задачи. При этом будем полагать заданным максимальное количество типов процессоров N и версий программного обеспечения K , максимально и минимально возможное количество процессоров каждого типа и шин (для процессоров m_i^+ и m_i^- соответственно, $i = 1, \dots, N$, а для шин n^+ и n^-). Обозначим через m_i количество процессоров i -го типа, включаемых в структуру аппаратно-программного комплекса ($i = 1, \dots, N$), через n – количество шин, а через k – количество версий программного обеспечения. Не трудно увидеть, что переменные нашей оптимизационной задачи (k, m_i, n) являются целочисленными, т. е. мы имеем задачу дискретной оптимизации.

Приведем формальную запись поставленной задачи оптимизации структуры аппаратно-программного комплекса с мультиверсионным программным обеспечением для систем управления реального времени:

$$R_0(m_1, \dots, m_N, n, k) \rightarrow \max,$$

при условиях

$$R_l(m_1, \dots, m_N, n, k) \geq R_l^0, l = 1, \dots, L_R,$$

$$C_l(m_1, \dots, m_N, n, k) \leq C_l^0, l = 1, \dots, L_C,$$

$$m_i^- \leq m_i \leq m_i^+, i = 1, \dots, N,$$

$$n^- \leq n \leq n^+,$$

$$1 \leq k \leq K.$$

В данной задаче приняты следующие обозначения: R_0 – ведущий критерий оценки производительности; $R_l, l = 1, \dots, L_R$ – второстепенные критерии оценки производительности; $C_l, l = 1, \dots, L_C$ – критерии оценки стоимости; R_l^0, C_l^0 – предельные допустимые уровни критериев, переведённых в ограничения.

При проектировании оптимальной структуры АПК нельзя ориентироваться на максимальное быстродействие спецпроцессоров, а надо выбирать ее так, чтобы обеспечить максимальную производительность всего АПК в целом. Для формальной постановки задачи это означает, что величины среднего времени выполнения одной команды T_{0i} процессорами i -го типа не могут быть постоянными, а должны также быть включены в число переменных оптимизации. Более того, параметры системы v_i и μ_i становятся функциями от T_{0i} , т. е. $v_i = v_i(T_{0i})$, $\mu_i = \mu_i(T_{0i})$. Это приводит к значительному усложнению оптимизационной задачи, превращая ее в двухуровневую иерархическую задачу:

$$(R_0^*(T_{01}, \dots, T_{0i}, T_{0N}), R_l^*(T_{01}, \dots, T_{0i}, T_{0N}), C_l^*(T_{01}, \dots, T_{0i}, T_{0N})) \rightarrow \text{extr},$$

где R_0^*, R_l^* и C_l^* – решение задачи оптимизации.

Прежде всего, нужно отметить, что пространство возможных решений является дискретным, так как конфигурация аппаратно-программного комплекса определяется количеством процессоров различных типов и шин оперативной памяти, которые могут быть только целыми числами. При этом мощность пространства поиска быстро растёт с увеличением количества типов процессоров.

Если приблизительно оценить мощность пространства оптимизации, то получим общее число возможных конфигураций более $1,6 \cdot 10^{20}$. При этом существенные ограничения не будут значительно сокращать количество поисковых точек.

Существенную проблему для решения получаемой задачи оптимизации создает способ вычисления целевых функций (критериев), которые в большинстве своем заданы алгоритмически.

Налицо все признаки сложной задачи оптимизации: алгоритмически заданные функции, разный тип переменных задачи, изменяемое количество искомых переменных, большая область поиска оптимального решения.

При решении подобных задач оптимизации хорошо зарекомендовали себя эволюционные алгоритмы оптимизации [15–18]. Поэтому исследование эффективности эволюционных алгоритмов при оптимизации структуры аппаратно-программных комплексов систем управления реального времени может быть указано в качестве возможного направления дальнейших исследований.

Заключение

Существующие модели производительности позволяют определять минимальную аппаратную конфигурацию многопроцессорного вычислительного комплекса. Предложенный в данной статье подход позволяет находить конфигурации, обладающие аппаратной избыточностью (по сравнению с минимальной конфигурацией), но, за счёт этого, имеющие большую вероятность нахождения в состояниях, обеспечивающих производительность, достаточную для достижения целей функционирования проектируемой системы управления реального времени. Описанный подход является более гибким, чем простое дублирование всех аппаратных компонентов минимальной конфигурации, что может быть использовано для уменьшения затрат на создание и эксплуатацию проектируемой системы управления.

Предложенная модель может быть использована для оптимизации производительности многопроцессорных аппаратно-программных комплексов систем управления реального времени. При этом нужно учитывать, что ресурсы, выделенные на создание и эксплуатацию аппаратно-программного комплекса, всегда ограничены. Поэтому целесообразно рассматривать задачу оптимизации производительности как многокритериальную: одним критерием будет производительность, а другим – затраты на создание аппаратно-программного комплекса.

Таким образом, в данной статье приведена постановка задачи оптимизации структуры аппаратно-программных комплексов с мультиверсионным программным обеспечением, предназначенных для систем управления реального времени. В дальнейшем предлагается исследовать эффективность использования эволюционных методов оптимизации для решения данной задачи.

Библиографические ссылки

1. Васильев В. А., Легков К. Е., Левко И. В. Системы реального времени и области их применения // Информация и космос. 2016. № 3. С. 68–70.
2. Buttazzo G. Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications. New York, NY, Springer. 2011.
3. Sutter H. The free lunch is over: A fundamental turn toward concurrency in software // Dr. Dobbs's Journal. 2005. 30(3) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gotw.ca/publications/concurrency-ddj.htm> (дата обращения: 11.03.2021).
4. Liu Wang, Xiao Li, Shanghong Li Research on the Performance of Robot Multiprocessor Control System Based on BS Structure Digital Media // Microprocessors and Microsystems. 2020. Vol. 75. P. 103067.
5. Ефимов С. Н., Терсков В. А. Реконфигурируемые вычислительные системы обработки информации и управления. Красноярск : КРИЖТ ИрГУПС, 2013. 249 с.

6. Костров Б. В., Мартышкин А. И. Исследование структурной организации и оценка производительности многопроцессорных вычислительных систем с общей шиной // Известия Тульского гос. ун-та. Технич. науки. 2018. Вып. 2. С. 152–162.
7. Вентцель А. Д. Курс теории случайных процессов. М. : Наука, 1996. 400 с.
8. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 636 с.
9. Липаев В. В. Экономика производства программных продуктов. М. : СИНТЕГ, 2011. 358 с.
10. Использование метода роя частиц для формирования состава мультиверсионного программного обеспечения / И. В. Ковалев, Е. В. Соловьев, Д. И. Ковалев и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. № 3. С. 1–6.
11. К вопросу реализации мультиверсионной среды исполнения бортового программного обеспечения автономных беспилотных объектов средствами операционной системы реального времени / И. В. Ковалев, В. В. Лосев, М. В. Сарамуд и др. // Вестник СибГАУ. 2017. Т. 18, № 1. С. 58–61.
12. Efimov S. N., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Terskov V. A. Methods of Assessing the Characteristics of the Multiprocessor Computer System Adaptation Unit // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2016. No. 9 (3). P. 288–295.
13. Глазова М. А. Модель СОСОМО II: анализ и пути совершенствования // Экономика, статистика и информатика. 2008. № 3. С. 63–67.
14. Шеенок Д. А., Кукарцев В. В. Прогнозирование стоимости разработки систем с программной избыточностью // Известия Волгоградского гос. технич. ун-та. 2013. № 14 (117). С. 101–105.
15. Тархов Д. А., Радченко Д. С. Распределенные алгоритмы оптимизации // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. Том 11, № 2. С. 404–408.
16. Semenkin O. E., Popov E. A., Semenkin E. S. Cooperative self-configuring nature-inspired algorithm for a scheduling problem // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. P. 12080.
17. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Reading, MA: Addison-Wesley Professional. 1989.
18. Полякова А. С., Липинский Л. В., Семенкин Е. С. Автоматизированная система формирования состава коллектива многокритериальным генетическим алгоритмом. М. : Роспатент. 2020. № государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2020663770 от 22.10.2020.

References

1. Vasil'ev V. A., Legkov K. E., Levko I. V. [The real-time systems and applications]. *Informaciya i kosmos*. 2016, No. 3, P. 68–70. (In Russ.)
2. Buttazzo G. Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications. New York, NY, Springer. 2011.
3. Sutter H. The free lunch is over: A fundamental turn toward concurrency in software // *Dr. Dobbs's Journal*. 2005, No. 30 (3). Available at: <http://www.gotw.ca/publications/concurrency-ddj.htm> (accessed: 11.03.2021).
4. Liu Wang, Xiao Li, Shanghong Li Research on the Performance of Robot Multiprocessor Control System Based on BS Structure Digital Media. *Microprocessors and Microsystems*. 2020, Vol. 75, P. 103067.
5. Efimov S. N., Terskov V. A. *Rekonfiguriruyemye vychislitel'nye sistemy obrabotki informacii i upravleniya* [Reconfigurable computing systems for information processing and management]. Krasnoyarsk, KRIZHT IrGUPS Publ., 2013, 249 p.

6. Kostrov B. V., Martyshkin A. I. [Investigation of the structural organization and performance evaluation of multiprocessor computing systems with a common bus]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2018, Vol. 2, P. 152–162. (In Russ.)
7. Wentzel A. D. *Kurs teorii sluchajnyh processov* [Course of the theory of random processes]. Moscow, Nauka Publ., 1996, 400 p.
8. Bakhvalov N. S., Zhidkov N. P., Kobelkov G. M. *Chislennye metody* [Numerical methods]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2004, 636 p.
9. Lipaev V. V. *Ekonomika proizvodstva programmyh produktov* [The economics of the software engineering]. Moscow, SINTEG Publ., 2011, 358 p.
10. Kovalev I. V., Solov'ev E. V., Kovalev D. I. et al. [Application of particle swarm optimization to design of N-version software composition]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*. 2013, No. 3, P. 1–6. (In Russ.)
11. Kovalev I. V., Losev V. V., Saramud M. V. et al. [On the issue of implementing a multiversion execution environment for on-board software of autonomous unmanned objects by means of a real-time operating system]. *Vestnik SibGAU*. 2017, Vol. 18, No. 1, P. 58–61. (In Russ.)
12. Efimov S. N., Tyapkin V. N., Dmitriev D. D., Terskov V. A. Methods of Assessing the Characteristics of the Multiprocessor Computer System Adaptation Unit. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. 2016, No. 9 (3), P. 288–295.
13. Glazova M. A. [COCOMO II Model: Analysis and Improvement]. *Ekonomika, statistika i informatika*. 2013, No. 14 (117), P. 101–105. (In Russ.)
14. Sheenok D. A., Kukarcev V. V. [Forecasting the cost of developing systems with software redundancy]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018, Vol. 2, P. 152–162. (In Russ.)
15. Tarhov D. A., Radchenko D. S. [Distributed optimization algorithms]. *Sovremennye informacionnye tekhnologii i IT-obrazovanie*. 2015, Vol. 11, No. 2, P. 404–408. (In Russ.)
16. Semenkin O. E., Popov E. A., Semenkin E. S. Cooperative self-configuring nature-inspired algorithm for a scheduling problem. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021, P. 12080.
17. Goldberg D. E. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Reading, MA: Addison-Wesley Professional. 1989.
18. Polyakova A. S., Lipinskij L. V., Semenkin E. S. *Avtomatizirovannaya sistema formirovaniya sostava kollektiva mnogokriterial'nym geneticheskim algoritmom* [An automated system for forming the composition of a team using a multicriteria genetic algorithm]. Moscow, Rospatent, 2020, No. gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM [state registration of a computer program] RU 2020663770. (In Russ.)

© Ефимов С. Н., Терсков В. А., Серикова О. Ю., Попова А. В., 2021

Ефимов Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: efimov@bk.ru.

Терсков Виталий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: terskovva@mail.ru.

Серикова Олеся Юрьевна – аспирант; Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения. E-mail: olesyaserik@mail.ru.

Попова Анастасия Валерьевна – магистрант; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: nasty.popowa@yandex.ru.

Efimov Sergei Nikolaevich – Cand. Sc., assistant professor, department of informational and control systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: efimov@bk.ru.

Terskov Vitalii Anatolyevich – Dr. Sc., professor, department of informational and control systems; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: terskovva@mail.ru.

Serikova Olesya Yuryevna – graduate student; Krasnoyarsk Institute of Railway Transport, branch of the Irkutsk State University of Communications. E-mail: olesyaserik@mail.ru.

Popova Anastasiya Valer'evna – master's degree student; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: nasty.popowa@yandex.ru.
