

УДК 004.932

**А. П. Кирпичников, С. А. Ляшева, В. М. Трегубов,  
К. В. Шильников, М. П. Шлеймович**

## **ОБНАРУЖЕНИЕ ТРЕЩИН ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

*Ключевые слова: система мониторинга дорожного покрытия, анализ трещин дорожного покрытия, компьютерное зрение, обработка изображений.*

*В статье рассматриваются вопросы анализа трещин на изображениях в системах мониторинга дорожного покрытия на основе технологий компьютерного зрения. Разработка систем мониторинга дорожного покрытия необходима для прогнозирования долгосрочных эксплуатационных характеристик дорог и определения приоритетности политики их обслуживания. В статье приведен обзор методов, применяемых для анализа трещин дорожного покрытия, в том числе базирующихся на применении алгоритмов обработки изображений. Предложен алгоритм обнаружения трещин на изображениях дорожного покрытия, включающий следующие шаги: повышение контраста изображения; применение операции морфологического открытия; преобразование изображения в полутоновое; морфологическое преобразование bottom-hat; пороговое преобразование; очистка изображения от шума с помощью применения операции открытия; операция соединения потенциально разорванных трещин в единый объект; поиск контуров трещин; классификация контуров трещин; визуализация контуров найденных трещин. Описана реализация предложенного алгоритма в виде программного обеспечения экспериментальной автоматизированной системы, разработанного на языке программирования C++ с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV и функционирующего на аппаратной платформе на базе модульного суперкомпьютера Jetson TX2. Приведены результаты исследований предлагаемого подхода и показана его эффективность.*

**A. P. Kirpichnikov, S.A. Lyasheva, V. M. Tregubov,  
K. V. Shilnikov, M. P. Shleymovich**

## **DETECTING PAVEMENT CRACKS IN IMAGES**

*Keywords: pavement monitoring system, pavement cracks analysis, computer vision, image processing.*

*This paper discusses the matters of analyzing cracks in images within pavement monitoring systems, based on the computer vision technologies. Developing the pavement monitoring systems is necessary to forecast the long-term operation characteristics of roads and to prioritize the road service policies. The paper presents a review of methods used to analyze pavement cracks, including those based on using image processing algorithms. We are proposing an algorithm for detecting cracks in the images of pavements, including the following steps: Setting image contrast higher; using the morphologic opening operation; transforming the image into a half-tone image; bottom-hat morphologic transformation; threshold transformation; image denoising using the opening operation; operation of joining the potentially broken cracks into a single object; searching for crack contours; classifying the crack contours; and visualizing the contours of the cracks detected. The paper describes implementing the proposed algorithm as the software for an experimental automated system, which has been developed in the C++ programming language using the OpenCV computer vision library and which is functioning on the hardware platform based on the Jetson TX2 module supercomputer. This paper also provides the results of studying the approach proposed and demonstrates its efficiency.*

### **Введение**

В связи с тем, что объекты городской инфраструктуры, такие как дорожное покрытие, мосты, плотины, дома и здания, со временем теряют свои первоначальные качества, необходимо обеспечить решение задач по их срочному обслуживанию.

Образование трещин является основной причиной ухудшения состояния дорожного покрытия и строительных сооружений. Статистические характеристики трещин на строительных сооружениях имеют важное значение для оценки их состояния. Например, уже к 1980 г. в ряде зарубежных стран было установлено, что разработка систем мониторинга дорожного покрытия необходима для прогнозирования долгосрочных эксплуатационных характеристик дорог и определения приоритетности политики их обслуживания. В настоящее время эти системы определяют оптимальную стратегию поддержания работоспособности тротуаров. За последние десятилетия в ряде стран были предприняты попытки разработки программы исследования строительных объектов, которые описывают необходи-

мые физические измерения для оценки удобства их обслуживания. Исследование данных о степени разрушения является важной задачей в подобных системах. Используя данные о степени разрушения на строительных объектах, соответствующим агентствам необходимо оценивать и интерпретировать данные для определения их состояния и прогнозировать долгосрочную производительность. При этом, ручная съемка по-прежнему считается основным методом оценки состояния строительных сооружений. В рамках этого подхода инспекторы идентифицируют и записывают различные типы поверхностных разрушений, добываясь разным путем, порой опасным, до целевых сегментов объекта. Следует отметить, что этот подход является очень субъективным, а иногда и неточным. Результаты оценки могут варьироваться в зависимости от личного суждения, типа разрушения или тяжести [1]. Ручная проверка также может продлить процедуру, вызвать прерывание функционирования объекта и наложить проблемы с безопасностью, особенно в

труднодоступных местах объекта. Поэтому актуальны исследования по автоматизации таких проверок.

Один из перспективных и активно развивающихся подходов в данной области базируется на применении технологий компьютерного зрения для оценки наружного состояния строительно-технических конструкций и дорожного покрытия. Соответствующие методы относятся к структурному мониторингу здоровья указанных объектов.

В данной работе представлен алгоритм для обнаружения трещин дорожного покрытия в автоматизированной системе на основе средств компьютерного зрения. Кроме прочего, применение такой системы позволяет обеспечить лучшее понимание процесса разрушения объекта.

Для исследования эффективности представленного метода разработано программное обеспечение для распознавания трещин с использованием алгоритмов обработки и анализа изображений.

### **Методы обнаружения трещин в системах структурного мониторинга здоровья**

Для создания систем структурного мониторинга здоровья часто используются методы на основе модели механики разрушений [2]. Однако этот подход требует решение ряда проблем для мониторинга крупномасштабных гражданских инфраструктур из-за различных неопределенностей и неравномерно распределенных экологических воздействий.

Многие методы для широкомасштабных систем мониторинга основываются на применении большого количества датчиков и анализе интегрированных данных из распределенных источников [3, 4]. Однако следует отметить, что не так просто получить подтверждение того, что собранные данные на самом деле указывают на структурные повреждения, а не являются неисправностью сенсорной системы, или не связаны с наличием шумовых сигналов или их комбинацией.

Для решения рассматриваемой задачи также было предложено несколько методов на основе компьютерного зрения для обнаружения повреждений [5]. Одним из значительных преимуществ данного подхода является то, что почти все поверхностные дефекты (например, трещины и коррозии) идентифицируются с относительно высокой вероятностью. Раннее сравнительное исследование по поиску бетонных трещин с использованием четырех методов обнаружения края – быстрое преобразование Хаара, быстрое преобразование Фурье, градиентный оператор Собеля и детектор контуров Кэнни, – было проведено в работе [6]. В данной работе было определено, что быстрое преобразование Хаара является наилучшим решением задачи. За этим исследованием последовало исследование проблем с изменением краевых дефектов [7]. В статье [8] предложили подход для обнаружения стальных трещин с использованием технологий обработки изображений в сочетании с техникой скользящего окна. Здесь был применен фильтр Франги и детектор на основе матрицы гессиа. Однако обнаружение кромок является сложной проблемой, так как на результаты в значительной степени влияют шумы, связанные, в основ-

ном, с неоднородностью освещения и геометрическими искажениями. Одним из эффективных методов преодоления этих проблем является применение методов шумоподавления [9, 10].

Одним из возможных решений, которое обладает хорошей адаптацией к реальной ситуации, является использование машинного обучения [11, 12]. В этом случае собирают данные от системы неразрушающего контроля и осуществляют их анализ для оценки дефекта. Пример подхода, сочетающего получение информации на основе технологий обработки изображений и ее классификации на основе методов машинного обучения, приведен в работе [13].

В ранних исследованиях большинство подходов к обнаружению трещин на изображениях были основаны на методах пороговой обработки. Например, в работе [14] сравнивались четыре метода определения порогового значения – метод Оцу, метод гистограммы на основе регрессии, метод релаксации и метод Китлера. Авторы работы отметили, что метод гистограммы на основе регрессии дает наилучшие результаты для обнаружения трещин дорожного покрытия. Авторы статьи [15] вычислили разницу между модифицированным методом Оцу и половиной стандартного отклонения всех интенсивностей пикселей изображения как порогового значения для разделения пикселей на не трещины и потенциальные трещины. В работе [16] были рассмотрены пиксели в четырех направлениях (0°, 45°, 90°, 135°) с наименьшей суммарной интенсивностью. Текстура поверхности трещин и формы трещин, а также интенсивность пикселей использовались в качестве признаков для улучшения точности обнаружения дефектов. В более ранней работе [17] также использовался анализ текстур для получения информации о трещинах, а кроме этого использовалась информация о форме и результаты применения морфологического фильтра для определения расположения трещин. Другой популярный подход для извлечения информации о трещинах базируется на методах обнаружения границ. В статье [18] описано применение традиционного метода обнаружения границ посредством оператора Собеля для определения местоположений трещин на изображении тротуара. Также было обнаружено, что метод динамической оптимизации превосходит обнаружение трещин тротуара среди методов статистической пороговой обработки, обнаружения границ с помощью детектора Кэнни, идентификации на основе многомасштабного вейвлет-анализа, итеративного обрезания и динамической оптимизации.

В последнее время для анализа трещинообразования обратили внимание на морфологические методы. В данном подходе исходные пиксели обычно выбираются для соединения с локальными пикселями минимальной интенсивности. Когда начальный пиксель соединен с соседними пикселями низкой интенсивности, связанные линии образуют форму трещины. Морфологические методы, которые обрабатывают изображения с использованием структурных элементов, использовались для извлечения трещин дорожного покрытия. Элемент структурирования представляет собой компонент

двоичного изображения, имеющий определенную форму и размер, используемые для управления изображениями. В работе [19] края трещин могут быть получены путем применения морфологического преобразования дилатации в сочетании с морфологическим преобразованием эрозии. Эти преобразования также были использованы для заполнения промежутков между разрывами трещины. Затем два элемента трещины соединяются вместе, если их конечные точки находятся в одной соседней области, например, состоящей из 4 строк и 20 столбцов для горизонтальной трещины. В работе [20] было использовано морфологическое открытие для удаления изолированных трещин. Также в этой работе было предложено извлечение компоненты трещины с помощью морфологического преобразования bottom-hat. Различные типы разрушения тротуара, такие как выбоины, изучались в работах [21]. Наряду с этим для распознавания различных характеристик шоссе применяются данные 3D облачных точек, полученных в результате лазерного сканирования в сочетании с семантическим подходом [22].

#### Алгоритм обнаружения трещин на изображении дорожного покрытия

Предлагаемый алгоритм обнаружения трещин на изображении дорожного покрытия имеет следующие шаги:

1. Повышение контраста;
2. Морфологическое открытие;
3. Преобразование в полутоновый вид;
4. Bottom-hat преобразование;
5. Пороговое преобразование;
6. Очистка от шума;
7. Соединение разорванных трещин;
8. Поиск контуров трещин;
9. Классификация контуров трещин;
10. Визуализация контуров трещин.

Повышение контраста позволяет подчеркнуть детали изображений, например, сделать светлые области еще более светлыми, а темные – более темными.

Операция морфологического открытия позволяет объединить соседние темные пиксели в группы, тем самым образуя сплошную непрерывную темную область. Кроме того, в результате данного преобразования изображение принимает более усредненный цвет без сильных перепадов от черного к белому. Эта операция производится до преобразования изображения в полутоновый вид. Это обусловлено тем, что на разных изображениях цветовая палитра трещин и фона может варьироваться в совершенно разных диапазонах. Морфологическое открытие поможет более четко подчеркнуть трещины на фоне после перевода изображения в черно-белый формат.

В результате преобразования изображения в полутоновый вид сохраняется только яркостная информация. Это делается в первую очередь для увеличения скорости обработки изображения на последующих этапах, так как полутоновое изображение представляется только одним цветовым каналом.

Далее выполняется преобразование bottom-hat:

$$L_b = \max[(I \circ S\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}) \bullet S\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}, I] - I, \quad (1)$$

$$L_t = I - \min[(I \bullet S\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}) \circ S\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}, I], \quad (2)$$

где  $L_b$ ,  $L_t$  – выходные полутоновые изображения, полученные после применения морфологических преобразований;  $I$  – исходное полутоновое изображение;  $S\{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ\}$  – структурирующий элемент линейной формы, вращающийся на  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$ ;  $\circ$  – операция открытия;  $\bullet$  – операция закрытия. В результате выполнения преобразования bottom-hat на выходе формируются 8 изображений – по 4 от каждого типа структурирующего элемента. Применение этой операции позволяет обнаружить черно-белые трещины на фоне. На выходе преобразования bottom-hat формируется полутоновое изображение, в котором значение интенсивности пикселя зависит от степени точности наложения структурирующего элемента. Таким образом, можно выявить один недостаток bottom-hat преобразования – при использовании относительно длинных линейных структурирующих элементов результирующее изображение может иметь элементы, которые на самом деле не соответствуют действительной трещине, а при использовании более коротких структурирующих элементов появляется вероятность не обнаружить трещины, чья ширина будет превышать размер структурирующего элемента. Поэтому разработанный алгоритм предполагает выполнение двух параллельных преобразований – одно со структурирующим элементом длиной 15 пикселей, а второе – длиной 45 пикселей. Таким образом, решается проблема детектирования толстых трещин.

Для последующего обнаружения фонового шума выполняется пороговое преобразование полученных изображений. При этом пороговое значение вычисляется на основе анализа гистограммы интенсивностей. Далее, два бинарных изображения складываются между собой при помощи логической операции ИЛИ попиксельно, где значение белого пикселя считается 1, а значение черного – 0. Результатом данного этапа является бинарное изображение, где белому цвету соответствуют объекты трещин и оставшегося шума, а черному – фон.

Следующий шаг алгоритма необходим для максимально качественной и аккуратной без повреждения тонких объектов трещин на изображении очистки от остаточного шума. В данном случае не подойдут операции свертки и сглаживающих фильтров, поскольку такие операции могут зачистить изображение от тонких одно-пиксельных объектов, которые могут относиться к трещинам. Оптимальным является применение операции морфологического открытия со структурирующим элементом линейной формы, размер которой составляет 7 пикселей. При таком размере удалится большинство фонового шума и сохранится большинство объектов, принадлежащих именно к трещинам. Операция проводится 4 раза, по каждому из поворотов структурирующего элемента на  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$ . Следует отметить,

что данный этап не гарантирует полного очищения изображения от фонового шума, однако его результата вполне достаточно для дальнейшей работы с изображением и поиска трещин.

В случае недостаточного освещения участка дорожного покрытия или в случае, когда его повреждения еще не совсем значительны и не глубоки, может оказаться, что дефект или трещина выделяется на всем участке изображения неоднородно. Из-за этого единая целая трещина может быть определена как две отдельные трещины. Для решения этой проблемы в представленном алгоритме предлагается использование морфологической операции закрытия с линейным структурирующим элементом. Однако такой подход имеет недостаток, заключающийся в том, что оставшиеся объекты на изображении, относящиеся к фоновому шуму и располагающиеся в непосредственной близости друг от друга, также будут объединяться в целостные объекты, тем самым образуя ложный шум еще большего размера. Однако, в ходе множества экспериментов, было выявлено, что во многих случаях к этому этапу бинарное изображение приходит без сильного зашумления, а результаты ложного объединения будут отброшены на следующих этапах. Здесь также операция проводится 4 раза, по каждому из поворотов структурного элемента на  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $135^\circ$ . Длина структурного элемента выбирается также равной 7 пикселям. Это означает, что два объекта, расположенные на расстоянии 5 пикселей друг от друга и попадающие под расположение структурного элемента хотя бы в одном из направлений будут объединены в один объект.

После предыдущего этапа объединения разорванных трещин на изображении будет получено бинарное изображение, в котором пиксели черного цвета относятся к фону, а пиксели белого цвета к объекту. Для описания объектов, которыми являются трещины, очевидным решением является применение контурного анализа, который и выполняется на следующем этапе.

Далее выполняется классификация контуров трещин. В рассматриваемом алгоритме с этой целью используется анализ соотношения между периметром и площадью контура с учетом количества пикселей, составляющих контур. Решение о том, что контур  $C$  с числом точек  $|C|$ , периметром  $P$  и площадью  $S$  можно классифицировать как трещину, принимается в случае выполнения условия:

$$\begin{aligned} & 20 < |C| < 50 \ \& \ P/S \geq 0,46 \vee \\ & \vee 50 \leq |C| < 100 \ \& \ P/S \geq 0,25 \vee \\ & \vee 100 \leq |C| < 200 \ \& \ P/S \geq 0,162 \vee \\ & \vee 200 \leq |C| < 500 \ \& \ P/S \geq 0,11 \vee \\ & \vee |C| \geq 500 \ \& \ P/S \geq 0,05 \end{aligned} \quad (4)$$

На последнем шаге алгоритма осуществляется визуализация найденных контуров.

Описанный алгоритм был реализован в виде программного обеспечения экспериментальной автоматизированной системы анализа трещин на изображениях дорожного покрытия. Программное обеспечение разработано на язык программирования

C++ с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV.

Программное обеспечение предназначено для функционирования на аппаратной платформе, построенной на базе модульного суперкомпьютера Jetson TX2, разработанного для решения задач искусственного интеллекта и основанного на архитектуре NVIDIA Pascal™.

В ходе анализа работы системы были проведены экспериментальные исследования с тестовой выборкой, составляющей примерно 600 изображений участков дорожного покрытия. В результате было получено, что точность обнаружения трещины на основе разработанного алгоритма составляет не менее 95%. При этом процент ложных срабатываний не превысил 2%. Среднее время обнаружения трещины на стене составило  $\sim 0.182$  секунды, что позволяет в видео формате показывать не менее 5 кадров в секунду в реальном времени. Пример обнаружения трещин на изображении приведен на рис. 1.

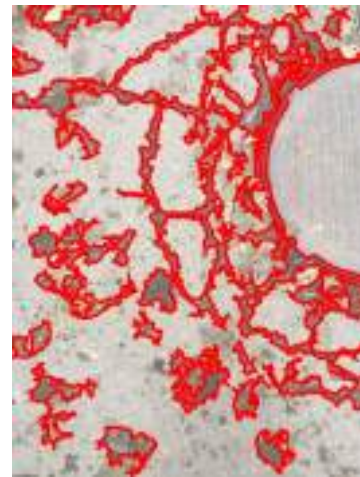


Рис. 1 – Обнаружение трещин на изображении

### Заключение

В заключение следует отметить, что описанный подход к анализу трещин показал свою эффективность и может быть применен в промышленных системах мониторинга дорожного покрытия, построенных на основе методов и средств компьютерного зрения.

Необходимо также отметить, что реализация промышленных систем на основе данного подхода требует учета реальных условий функционирования, например, связанных с помехоустойчивостью от воздействия электромагнитных помех [23, 24, 25].

Кроме того, одним из направлений повышения эффективности анализа контуров на изображении для обнаружения трещин является применение энергетических признаков вейвлет-преобразования [26, 27].

### Литература

1. G. Li, S. He, Y. Ju, and K. Du, *Automation in Construction*, **41**, 83-95 (2014).
2. S. Teidj, A. Khamlichi, A. Driouach, *Procedia Technology*, **22**, 86-93 (2016).

3. M. Kurata, J. Kim, J. P. Lynch, G. W. Van Der Linden, H. Sedarat, E. Thometz, L.-H. Sheng, *Journal of Structural Engineering*, **139**, 10, 1688-1702 (2013).
4. Y. Xia, B. Chen, S. Weng, Y.-Q. Ni, Y.-L. Xu, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **2**, 1, 29-46 (2012).
5. Y.-J. Chaa, J.G. Chen, O. Büyükoztürk, *Engineering Structures*, **132**, 300-313 (2017).
6. I. Abdel-Qader, O. Abudayyeh, M. E. Kelly, *Journal of Computing in Civil Engineering*, **17**, 4, 255-263 (2003).
7. T. Nishikawa, J. Yoshida, T. Sugiyama, Y. Fujino, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **27**, 1, 29-47 (2012).
8. C.M. Yeum, S.J. Dyke, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **30**, 10, 759-770 (2015).
9. L.I. Rudin, S. Osher, E. Fatemi, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **60**, 1-4, 259-268 (1992).
10. Y.-J. Cha, K. You, W. Choi, *Automation in Construction*, **71**, 181-188 (2016).
11. Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, P. Haffner, *Proceedings of the IEEE*, **86**, 11, 2278-2324 (1998).
12. J.B. Butcher, C.R. Day, J.C. Austin, P.W. Haycock, D. Verstraeten, B. Schrauwen, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **29**, 3, 191-207 (2014).
13. L. Wu, S. Mokhtari, A. Nazef, B. Nam, and H.-B. Yun, *Journal of Computing in Civil Engineering*, **30**, 1, 1-19 (2016).
14. H.N. Koutsopoulos, A.B. Downey, *Journal of Transportation Engineering*, **119**, 3, 402-418 (1993).
15. H. Oliveira, P.L. Correia, *Proc. Eur. Signal Process Conf.*, 622-626 (2009).
16. T.S. Nguyen, S. Begot, F. Duculty, M. Avila, *IEEE International Conference on Image Processing*, 1069-1072 (2011).
17. K.Y. Song, M. Petrou, J. Kittler, *Machine Vision and Applications*, **8**, 1, 63-75 (1995).
18. S. Tsao, N. Kehtarnavaz, P. Chan, R. Lytton, *Journal of Transportation Engineering*, **120**, 1, 62-64 (1994).
19. Y. Sun, E. Salari, E. Chou, *EEE Int. Conf. On*, 373-377 (2009).
20. L. Jing, Z. Ai Qin, *2010 International Conference on Machine Vision and Human-Machine Interface (MVHI)*, 576-579 (2010).
21. C. Koch, I. Brilakis, *Advanced Engineering Informatics*, **25**, 507-515 (2011).
22. C. Koch, G.M. Jog, I. Brilakis, *Journal of Computing in Civil Engineering*, **27**, 4, 370-378 (2013).
23. Z.M. Gizatullin, R.M. Gizatullin, *Journal of Communications Technology and Electronics*, **5**, 424-426 (2014).
24. Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, M.P. Shleimovich, *2017 IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*, 1-4 (2017).
25. Z.M. Gizatullin, M.G. Nuriev, R.M. Gizatullin, *Journal of Communications Technology and Electronics*, **63**, 1, 87-93 (2018).
26. М.П. Шлеймович, С.А. Ляшева, А.П. Кирпичников, *Вестник технологического университета*, **18**, 18, 223-228 (2015).
27. М.П. Шлеймович, А.П. Кирпичников, С.А. Ляшева, М.В. Медведев, *Вестник технологического университета*, **20**, 21, 103-107 (2017).

© **А. П. Кирпичников** – д.ф.-м.н., заведующий кафедрой интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНИТУ, e-mail: kirpichnikov@kstu.ru; **С. А. Ляшева** – к.т.н., доцент кафедры прикладной математики и информатики КНИТУ-КАИ, e-mail: salyasheva@kai.ru; **В. М. Трегубов** – к.т.н., директор института компьютерных технологий и защиты информации КНИТУ-КАИ, e-mail: vmtregubov@kai.ru; **К. В. Шильников** – аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ, e-mail: kimakim94@mail.ru; **М. П. Шлеймович** – к.т.н., заведующий кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления КНИТУ-КАИ, e-mail: mpshleymovich@kai.ru.

© **A. P. Kirpichnikov** – Dr. Sci, Head of the Department of Intelligent Systems & Information Systems Control, KNRTU, e-mail: kirpichnikov@kstu.ru; **S. A. Lyasheva** – PhD, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics & Informatics, KNRTU-KAI, salyasheva@kai.ru; **V. M. Tregubov** – PhD, Director of the Institute for Computer Technologies and Information Protection, KNRTU-KAI, mvmtregubov@kai.ru; **K. V. Shilnikov** – post-graduate student of the Department of Automated Information Processing Systems & Control, KNRTU-KAI, e-mail: kimakim94@mail.ru; **M. P. Shleymovich** – PhD, Head of the Department of Automated Information Processing Systems & Control, KNRTU-KAI, e-mail: mpshleymovich@kai.ru.

Все статьи номера поступили в редакцию журнала в период с 01.08.19. по 25.08.19.