
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНФОРМАТИКИ (05.13.17)

УДК 004.89

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-122-128

Прецедентный модуль для идентификации сигналов при акустико-эмиссионном мониторинге сложных технических объектов

П.Р. Варшавский, В.А. Барат, А.В. Кожевников

Работа посвящена актуальным вопросам повышения эффективности работы модуля для идентификации сигналов, получаемых во время акустико-эмиссионного мониторинга сложных технических объектов, использующего рассуждения на основе прецедентов. Системы мониторинга обрабатывают большие объёмы информации, требующие затрат значительных временных ресурсов при ручной обработке человеком (экспертом, оператором), поэтому для помощи экспертам (операторам) предлагается использовать методы машинного обучения и средства интеллектуального анализа данных. К сожалению, в указанных задачах не всегда удаётся получить необходимый набор данных (обучающую выборку) для эффективного применения средств машинного обучения.

По этой причине предложено использовать перспективный и активно применяемый в системах искусственного интеллекта (интеллектуальных системах) подход на основе прецедентов, который способен работать при малых объёмах обучающей выборки и накапливать опыт решения подобных задач. Однако он имеет существенный недостаток — с ростом числа прецедентов растёт и число операций сравнения для обработки новой ситуации (задачи). Указанную проблему возможно решить за счёт использования матрицы сходства прецедентов. Вместо периодического сокращения базы накопленных прецедентов, что является затратной по временным ресурсам процедурой, следует ограничить количество накопленных прецедентов и сохранить наиболее значимые (характерные) из них. Помимо этого, рекомендовано прецедентное представление спектра сигнала для снижения временных затрат на одну операцию сравнения двух прецедентов.

Описанный метод представления спектра сигнала не только позволяет сократить объёмы обрабатываемой информации, но и позволяет упростить метрику для сравнения прецедентов. Данные модификации позволяют повысить эффективность (быстродействие) разработанного в среде MS Visual Studio на языке C# прецедентного модуля для идентификации сигналов акустической эмиссии. Результаты апробации на реальных данных акустико-эмиссионного мониторинга подтвердили обоснованность применения предложенных модификаций для разработанного прецедентного модуля.

Ключевые слова: прецедентный подход, мониторинг, анализ данных, акустическая эмиссия.

Для цитирования: Варшавский П.Р., Барат В.А., Кожевников А.В. Прецедентный модуль для идентификации сигналов при акустико-эмиссионном мониторинге сложных технических объектов // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 122—128. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-122-128.

The Case-Based Module for Identifying the Signals Used in Acoustic-Emission Monitoring of Complex Technical Objects

P.R. Varshavskiy, V.A. Barat, A.V. Kozhevnikov

The article addresses the topical issues of achieving more efficient operation of the module for identifying the signals obtained during acoustic-emission monitoring of complex technical objects that involves case-based reasoning. Monitoring systems process large amounts of information that require significant time resources for manually processing them by a human (an expert or operator). Therefore, for rendering help to experts (operators), it is proposed to use machine learning methods and data mining tools. Unfortunately, in these tasks it is not always possible to obtain the necessary data set (a training sample) for effectively using the machine learning tools.

In view of the above, it is proposed to apply the advanced approach known as case-based reasoning which is actively used in artificial intelligence systems, and which is able to operate with small volumes of the training sample and accumulate experience in solving such problems. However, this approach has a significant drawback: with an increase in the number of precedents, so does the number of comparison operations for processing a new situation (task). This can be solved by using the case similarity matrix. Instead of periodically reducing the base of accumulated cases, which is a time-consuming procedure, it is proposed to limit the number of accumulated use-cases and maintain the most significant (characteristic) ones.

In addition, a case presentation of the signal spectrum is proposed to reduce the time spent on one operation of comparing two use-cases. Not only does the proposed method of representing the signal spectrum reduce the amount of processed information, but it also simplifies the metric for comparing use-cases.

These modifications can significantly increase the efficiency (throughput) of the case-based module for identifying acoustic emission signals developed in the MS Visual Studio environment in the C# language. The results of testing the module on real acoustic emission monitoring data have confirmed the validity of applying the proposed modifications for the developed case-based module.

Key words: case-based approach, monitoring, data analysis, acoustic emission.

For citation: Varshavskiy P.R., Barat V.A., Kozhevnikov A.V. The Case-Based Module for Identifying the Signals Used in Acoustic-Emission Monitoring of Complex Technical Objects. Bulletin of MPEI. 2020;4:122—128. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-122-128.

Введение

Постоянное наблюдение за техническим состоянием сложных промышленных объектов (мониторинг) — область, в которой активно развиваются алгоритмическое и программное обеспечение, внедряются методы искусственного интеллекта [1]. Возможность отслеживания возникновения и развития микроскопических дефектов позволяет планировать профилактическое обслуживание, а также предотвращать аварийные ситуации [2, 3]. Системы мониторинга измеряют огромные объемы данных, большая часть которых не содержит информации о наличии дефектов [2, 4].

Система регистрации данных, основанная на амплитудной дискриминации, используемой в системах мониторинга, позволяет фильтровать шумовые сигналы, лежащие ниже порогового значения. Иногда возникает необходимость определения низкоамплитудных сигналов, тогда порог снижается, и человеку (эксперту, оператору, лицу, принимающему решения (ЛПР)) приходится обрабатывать огромные объемы данных самостоятельно [4, 5]. Для помощи ЛПР разработан модуль на основе прецедентов (CBR — Case-Base Reasoning) для идентификации сигналов при акустико-эмиссионном (АЭ) мониторинге сложных технических объектов [1]. Однако быстрдействие данного CBR-модуля не соответствует рабочей нагрузке при обработке данных мониторинга в режиме реального времени. Для повышения его эффективности предложено модифицировать представление информации о сигнале АЭ в виде прецедента.

Прецедентное представление спектра акустико-эмиссионного сигнала

Любой электрический сигнал можно представить эквивалентно в частотной области в виде дискретного или непрерывного спектра [6]. Представление в частотной области отражает информацию о локализации энергии сигнала в определенном частотном диапазоне.

Частотный спектр является характеристикой для оценивания сигнала с целью его классификации. Для того, чтобы расчет меры был инвариантен по отношению к фазовой информации для прецедентного представления сигнала, используются амплитудные значения спектральных коэффициентов. Это позволяет отказаться от сравнения сигналов с применением рекурсивной метрики Левенштейна [7] и перейти к более простым метрикам, на обработку которых требуется меньше времени.

Для получения спектра дискретного сигнала в радиотехнике чаще всего используют дискретное преобразование Фурье (DFT) [8], вычисляемое с использованием различных алгоритмов, но на практике активно используется быстрое преобразование Фурье (FFT) [8], позволяющее получить результат за время $O(N \log(N))$, которое при большой длине сигнала значительно меньше, чем $O(N^2)$, необходимое для прямого вычисления [3].

Для использования алгоритма FFT необходимо, чтобы длина сигнала была равна 2^k , поэтому перед выполнением алгоритма длину сигнала увеличим до ближайшего 2^k . Благодаря свойству симметрии алгоритма FFT устранение одной из половин полученного

спектра (например, правой) не удалит информации о самом сигнале, тогда рассматриваемая длина спектра станет 2^{k-1} [6].

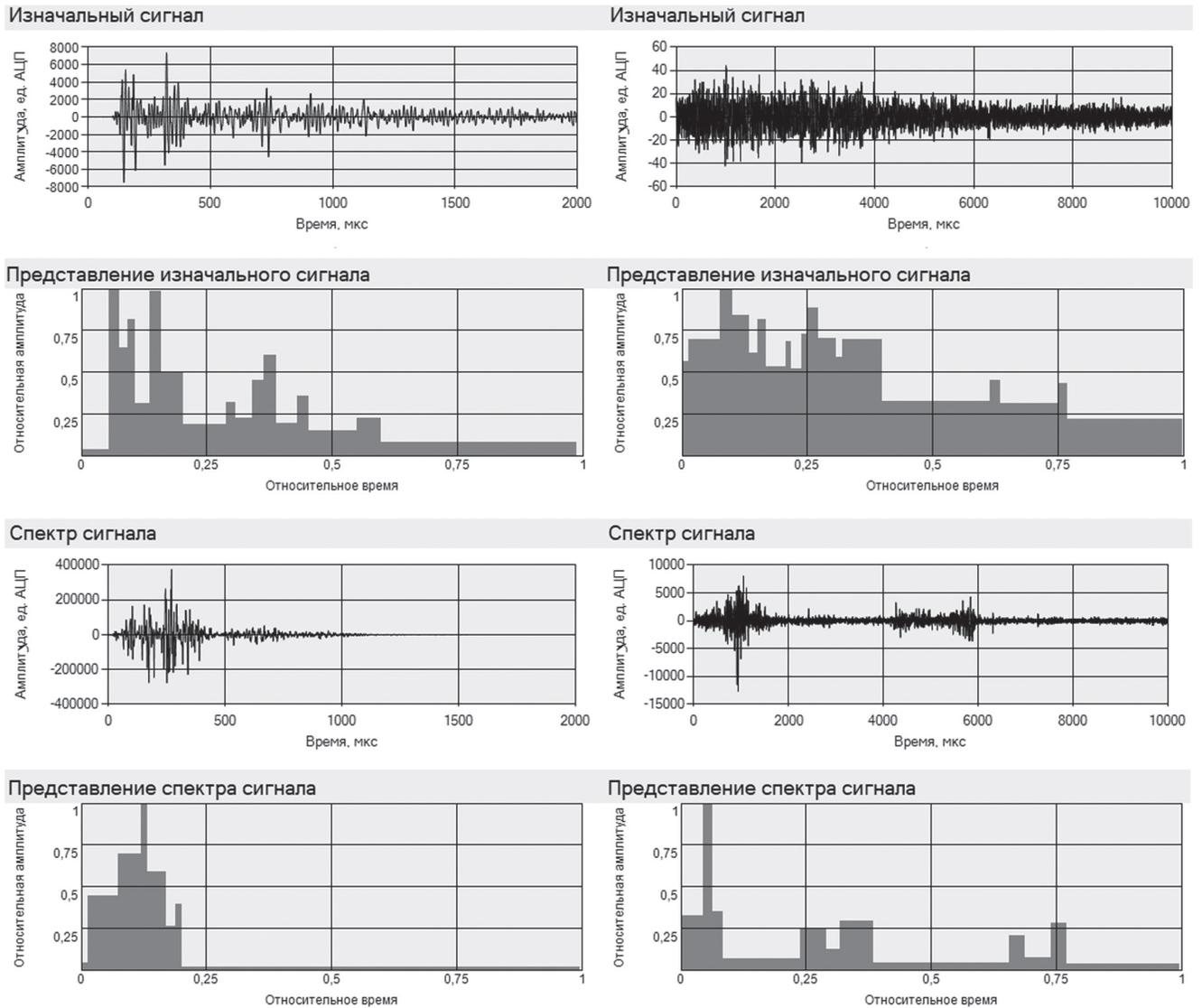
Затем изучаемый спектр проходит процедуру представления сигнала в виде прецедента [1, 9]. На рисунке изображены сигналы, спектры и их прецедентное представление. Заметим, что представление спектра содержит в себе последовательность четверок, которая короче последовательности представления самого сигнала. Сокращение последовательностей четверок сказывается на времени сравнения двух прецедентов.

Сравнение двух прецедентов для представления спектров сигналов

Помимо сокращения последовательности четверок, использование представления спектра дает важное

преимущество над представлением сигнала, так как спектр игнорирует смещение по фазе сигнала. Другими словами, два идентичных, но отличающихся фазой сигнала имеют одинаковый спектр. Для решения проблемы сравнения сигналов, отличающихся фазой, в [1] предложено применение рекурсивной метрики Левенштейна [10, 11]. Поскольку фаза сигнала не влияет на спектр, можно отказаться от рекурсивной метрики и перейти к более простым в вычислительном плане метрикам.

Представление спектра сигнала, по сути, является кусочно-постоянной функцией. Для такого типа функций выполняется критерий интегрируемости Римана [12]: если функция f ограничена на отрезке $[a, b]$ и имеет на нем лишь конечное число точек разрыва, то она интегрируема на $[a, b]$.



a

б

Сравнение представлений сигналов и их спектров для различных видов сигналов при АЭ-мониторинге:

a — импульсивный сигнал; *б* — непрерывный сигнал

Функция, полученная из абсолютной разности двух кусочно-постоянных функций, также является кусочно-постоянной функцией, интеграл от такой функции может считаться метрикой для сравнения двух прецедентов:

$$Sim(C, T) = 1 - \int_0^1 |f_C(x) - f_T(x)| dx,$$

где C, T, f_C, f_T — два сравниваемых прецедента и их последовательности.

Для вычисления данного интеграла сформируем последовательность f_{CT} как модуль разности двух последовательностей, затем найдем сумму площадей, сформированных из четверок:

$$Sim(C, T) = 1 - \sum_i \delta A_{CT_i} (t_{кCT_i} - t_{нCT_i}),$$

где δA_{CT_i} — относительная амплитуда; $t_{кCT_i}, t_{нCT_i}$ — относительные временные границы диапазона времени i -й четверки последовательности f_{CT} .

Прецедентное представление сигнала и изменение метрики значительно сокращают время сравнения двух сигналов, однако с ростом числа сохраненных прецедентов растет время обработки одного сигнала, и, следовательно, быстродействие CBR-модуля не соответствует рабочей нагрузке системы мониторинга. Для решения данной проблемы необходимо разработать алгоритм контроля за числом сохраненных прецедентов.

Использование матрицы сходства для хранения информации при классификации сигналов

Для решения задачи классификации [13 — 15] сигналов АЭ CBR-модуль накапливает прецеденты, число которых спустя некоторое время превышает допустимое значение для эффективной работы модуля. Чаще всего для устранения данной проблемы применяют алгоритмы сокращения числа прецедентов за счет использования методов классификации [13, 15, 16] и кластеризации [16 — 18], а также вариантов построения иерархических структур [19, 20], однако процедура сокращения тратит неоправданно много временных ресурсов при мониторинге, поэтому предложим иной подход.

Пусть каждому классу соответствует набор наиболее значимых (характерных) для данного класса прецедентов, размер которого устанавливается пользователем. Он накапливается и меняется в ходе обработки сигналов АЭ. Для него формируется матрица сходства $M_{S \times S}$, где S — размер набора; M_{ij} — коэффициент сходства между i -м и j -м прецедентами в наборе (обозначим прецеденты M_i и M_j , соответственно).

Изначально в набор класса сохраняется только выбранный пользователем эталонный прецедент. Матрица сходства имеет вид:

$$M_{S \times S} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}.$$

Для каждого нового прецедента определим степени сходства C_j со всеми прецедентами внутри матрицы класса. Если новый прецедент имеет высокую степень сходства с эталонным прецедентом, а максимальное количество прецедентов не достигнуто, то прецедент добавляется в матрицу. После этого матрица сходства в общем случае выглядит как

$$M_{S \times S} = \begin{pmatrix} 1 & M_{1,2} & \dots & M_{1,N-1} & M_{1,N} & 0 & \dots & 0 \\ M_{2,1} & 1 & \dots & M_{2,N-1} & M_{2,N} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N-1,1} & M_{N-1,2} & \dots & 1 & M_{N-1,N} & 0 & \dots & 0 \\ M_{N,1} & M_{N,2} & \dots & M_{N,N-1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

где N — накопленное число прецедентов в классе $N \in [1, S]$.

Если $|C_j - M_{i,j}| < 0,02$ для всех $j \in [1, N]$, то прецедент C идентичен прецеденту M_i . В этом случае вместо добавления прецедента C увеличивается счетчик у прецедента M_i .

При достижении максимального количества прецедентов матрица полностью заполнена отличными от 0 значениями, и $0 < M_{i,j} = M_{j,i} \leq 1, \forall i, j \in [1, N]$, причем $\forall_i \in [1, N], M_{i,i} = 1$. Для каждого M_i считаем среднее значение M'_i степени сходства с остальными прецедентами:

$$M'_i = \frac{\sum_{j \in [1, N]} M_{i,j}}{N}; \quad C' = \frac{\sum_{i \in [1, N]} M_i}{N}.$$

При обнаружении нового прецедента C вычисляем среднее значение C' степени сходства с прецедентами из набора, затем сравниваем $\min_i (M'_i)$ и C' . Если среднее значение степени сходства $C' = \min_i (M'_i)$, то новый прецедент C подходит больше M_i и занимает его место в матрице сходства. Эталонный прецедент (заданный экспертом) нельзя заменить, поэтому меняться будут только прецеденты, определенные системой. Стоит заметить, что заменяются соответствующие прецеденту M_i строка и столбец в матрице

$$M_{S \times S} = \begin{pmatrix} 1 & M_{1,2} & \dots & M_{1,i-1} & C_1 & M_{1,i+1} & \dots & M_{1,S} \\ M_{2,1} & 1 & \dots & M_{2,i-1} & C_2 & M_{2,i+1} & \dots & M_{2,S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{i-1,1} & M_{i-1,2} & \dots & 1 & C_{i-1} & M_{i-1,i+1} & \dots & M_{i-1,S} \\ C_1 & C_2 & \dots & C_{i-1} & 1 & C_{i+1} & \dots & C_S \\ M_{i+1,1} & M_{i+1,2} & \dots & M_{i+1,i-1} & C_{i+1} & 1 & \dots & M_{i+1,S} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{S,1} & M_{S,2} & \dots & M_{S,i-1} & C_S & M_{S,i+1} & \dots & M_{S,S} \end{pmatrix}.$$

Результаты апробации

Файл		Исходный модуль			Модифицированный модуль				
N	T_{meas}, c	T_{mod}, c	count	$\partial T, \%$	T_{mod}, c	count	$\partial T, \%$	T_{fft}, c	$\partial T_{fft}, \%$
10000	3600	38,76100	7421	1,08	42944	7375	1,19	7857	0,22
20000	10800	124,0330	16837	1,15	90170	17029	0,83	14601	0,14
40000	1800	302,7250	30199	16,8	163648	30599	9,09	29764	1,65
60000	1800	574,0050	48135	31,9	241954	48074	13,4	52009	2,89
75000	1800	734,9710	61007	40,8	315240	60983	17,5	72177	4,01
110000	3600	1434,871	77141	39,9	339100	77563	9,42	106852	2,97
340000	9000	5772,489	185992	64,1	1063991	189090	11,8	325064	3,61

Наличие матрицы сходства позволяет решить следующие проблемы:

— контроль за количеством накопленных прецедентов для анализа: СBR-системы при постоянном росте числа прецедентов нелинейно снижают эффективность своей работы;

— хранение ранее рассчитанных значений: нет необходимости в проведении повторных вычислений;

— сравнение прецедентов со всеми прецедентами класса: решение о добавлении нового прецедента принимается не на основе его сходства с одним или несколькими прецедентами из класса, а с учётом сходства со всеми прецедентами класса за счёт вычисления среднего значения его степени сходства со всеми прецедентами класса.

Результаты апробации предложенных модификаций

Для оценки эффективности предложенных модификаций алгоритмов СBR-модуля для идентификации сигналов АЭ-мониторинга сложных технических объектов отобрано несколько файлов с АЭ-сигналами, накопленными в процессе мониторинга за различные временные интервалы. Указанные файлы отличаются временем измерения и интенсивностью поступления сигналов. В таблице представлена информация о файле (количество N сигналов в файле и длительность измерения T_{meas}) и результаты апробации (время обработки файла T_{mod} , количество идентифицированных прецедентов $count$). Помимо этого в процессе мониторинга помимо самого сигнала отображается его спектр, в таком случае желательно исключить повторный подсчет спектров сигналов внутри модуля и передавать непосредственно готовый спектр, что сократит время работы в несколько раз. Для предложенной модификации в силу временных затрат алгоритма FFT созданы файлы, содержащие готовые спектры, соответствующие сиг-

налам из файлов с данными. В таблице T_{fft} соответствует времени обработки готовых спектров сигналов.

Для большей наглядности для каждого алгоритма добавлены значения относительного времени работы ∂T :

$$\partial T = (T_{mod} / T_{meas}) 100\%.$$

По данным таблицы видно, что предложенные модификации незначительно уступают по времени выполнения на малом количестве сигналов, однако с ростом числа сигналов выигрыш во времени становится значительным при том, что качество классификации СBR-модулем остаётся на прежнем уровне.

Заключение

Изложены модификации алгоритмов СBR-модуля для идентификации сигналов АЭ-мониторинга сложных технических объектов с целью повышения эффективности (быстродействия) разработанного модуля.

Для сокращения объемов хранимой информации предложено использование прецедентного представления спектра сигнала вместо представления самого сигнала.

Независимость представления спектра сигнала от фазы позволяет использовать более простую в вычислительном плане метрику сравнения двух прецедентов, что значительно сокращает время, затраченное на процедуру сравнения.

Контроль за числом сохраненных прецедентов для каждого класса в виде матрицы сходства ограничивает временные затраты на процедуру обработки одного прецедента.

По результатам апробации можно сделать вывод, что внедрение модификаций в СBR-модуль для идентификации сигналов АЭ-мониторинга значительно повышает скорость обработки сигналов без потерь в качестве их классификации СBR-модулем.

Литература

1. Варшавский П.Р., Алехин Р.В., Кожевников А.В. Разработка прецедентного модуля для идентификации сигналов при акустико-эмиссионном мониторинге сложных технических объектов // Программные продукты и системы. 2019. № 2. С. 207—213.

References

1. Varshavskiy P.R., Alekhin R.V., Kozhevnikov A.V. Razrabotka Pretsedentnogo Modulya dlya Identifikatsii Signalov pri Akustiko-emissionnom Monitoringe Slozhnykh Tekhnicheskikh Ob'ektov. Programmnye Produkty i Sistemy. 2019;2:207—213. (in Russian).

2. **Барат В.А., Алякритский А.Л.** Автоматизированный метод анализа данных акустико-эмиссионного контроля // *Контроль. Диагностика*. 2009. № 12. С. 12—19.
3. **Терентьев Д.А.** Идентификация сигналов акустической эмиссии при помощи частотно-временного анализа // *В мире неразрушающего контроля*. 2013. № 2. С. 51—55.
4. **Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А.** Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ // *Инженерный вестник*. 2015. № 1. С. 533—538.
5. **Bardakov V.V., Barat V.A., Sagaidak A.I., Elizarov S.V.** Acoustic Emission Behaviour of Over-reinforced Concrete Beams // *Intern. J. Civil Eng. and Techn.* 2018. V. 9(8). Pp. 1583—1594.
6. **Малозёмов В.Н., Просеков О.В.** О быстром преобразовании Фурье малых порядков // *Вестник СПбГУ. Серия «Математика. Механика. Астрономия»*. 2003. № 1. С. 36—45.
7. **Черненко В.М., Гапанюк Ю.Е.** Методика идентификации пассажира по установочным данным // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2012. № 3(3). С. 30—39.
8. **Mastriani M.** Quantum-classical Algorithm for an Instantaneous Spectral Analysis of Signals: a Complement to Fourier Theory // *J. Quantum Information Sci.* 2018. V. 8. Pp. 52—77.
9. **Alekhin, R., Varshavsky, P., Ereemeev, A., Kozhevnikov A.** Application of the Case-based Reasoning Approach for Identification of Acoustic-emission Control Signals of Complex Technical Objects // *Proc. III Russian-Pacific Conf. Computer Techn. and Appl.* 2018. Pp. 28—31.
10. **Aamodt A., Plaza E.** Case-based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches // *Artificial Intelligence Communications*. 1994. V. 7. No. 1. Pp. 39—59.
11. **Рассел С., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход. М.: Вильямс, 2007.
12. **Водопьянов С.К.** Интегрирование по Риману. Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. ун-та, 2012.
13. **Richter M., Weber R.** Case-based Reasoning: a Textbook. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
14. **Perner P.** Introduction to Case-based Reasoning for Signals and Images. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
15. **Montani S, Jain L.** Successful Case-based Reasoning Applications. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
16. **Варшавский П.Р., Ар Кар М'о, Шункевич Д.В.** Применение методов классификации и кластеризации для повышения эффективности работы прецедентных систем // *Программные продукты и системы*. 2017. № 4. С. 625—631.
17. **Khan M.J., Hayat H. Awan I.** Hybrid Case-base Maintenance Approach for Modeling Large Scale Case-based Reasoning Systems // *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.* 2019. V. 9. Pp. 1—25.
2. **Barat V.A., Alyakritskiy A.L.** Avtomatizirovannyy Metod Analiza Danykh Akustiko-emissionnogo Kontrolya. *Kontrol'. Diagnostika*. 2009;12:12—19. (in Russian).
3. **Terent'ev D.A.** Identifikatsiya Signalov Akusticheskoy Emissii pri Pomoshchi Chastotno-vremennogo Analiza. V *Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*. 2013;2: 51—55. (in Russian).
4. **Aleshin N.P., Grigor'ev M.V., Shchipakov N.A.** Sovremennoe Oborudovanie i Tekhnologii Nerazrushayushchego Kontrolya PKM. *Inzhenernyy Vestnik*. 2015;1: 533—538. (in Russian).
5. **Bardakov V.V., Barat V.A., Sagaidak A.I., Elizarov S.V.** Acoustic Emission Behaviour of Over-reinforced Concrete Beams. *Intern. J. Civil Eng. and Techn.* 2018;9(8): 1583—1594.
6. **Malozemov V.N., Prosekov O.V.** O Bystrom Preobrazovanii Fur'e Malykh Poryadkov. *Vestnik SPbGU. Seriya «Matematika. Mekhanika. Astronomiya»*. 2003;1: 36—45. (in Russian).
7. **Chernen'kiy V.M., Gapanyuk Yu.E.** Metodika Identifikatsii Passazhira po Ustanovochnym Dannym. *Inzhenernyy Zhurnal: Nauka i Innovatsii*. 2012;3(3):30—39. (in Russian).
8. **Mastriani M.** Quantum-classical Algorithm for an Instantaneous Spectral Analysis of Signals: a Complement to Fourier Theory. *J. Quantum Information Sci.* 2018;8: 52—77.
9. **Alekhin, R., Varshavsky, P., Ereemeev, A., Kozhevnikov A.** Application of the Case-based Reasoning Approach for Identification of Acoustic-emission Control Signals of Complex Technical Objects. *Proc. III Russian-Pacific Conf. Computer Techn. and Appl.* 2018:28—31.
10. **Aamodt A., Plaza E.** Case-based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *Artificial Intelligence Communications*. 1994;7;1: 39—59.
11. **Rassel S., Norvig P.** *Iskusstvennyy Intellekt: Sovremennyy Podkhod*. M.: Vil'yams, 2007. (in Russian).
12. **Vodop'yanov S.K.** *Integrirovaniye po Rimanu*. Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo gos. un-ta, 2012. (in Russian).
13. **Richter M., Weber R.** *Case-based Reasoning: a Textbook*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
14. **Perner P.** *Introduction to Case-based Reasoning for Signals and Images*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
15. **Montani S, Jain L.** *Successful Case-based Reasoning Applications*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
16. **Varshavskiy P.R., Ar Kar M'o, Shunkevich D.V.** *Primeneniye Metodov Klassifikatsii i Klasterizatsii dlya Povysheniya Effektivnosti Raboty Pretsedentnykh Sistem*. *Programmnye Produkty i Sistemy*. 2017;4:625—631. (in Russian).
17. **Khan M.J., Hayat H. Awan I.** *Hybrid Sase-base Maintenance Approach for Modeling Large Scale Case-based Reasoning Systems*. *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.* 2019;9:1—25.

18. **Park Y.J.** Improving Real-time Efficiency of Case-based Reasoning for Medical Diagnosis // *Studies in Health Technology and Informatics*. 2014. Pp. 52—55.

19. **Wess S., Althoff K.D., Derwand G.** Using kd Trees to Improve the Retrieval Step in Case-based Reasoning. Heidelberg: Springer, 1993. Pp. 167—181.

20. **Negny S., Riesco H., Lann J.** Effective Retrieval and New Indexing Method for Case Based Reasoning: Application in Chemical Process Design // *Engineering Appl. of Artificial Intelligence*. 2010. V. 23(6). Pp. 880—894.

18. **Park Y.J.** Improving Real-time Efficiency of Case-based Reasoning for Medical Diagnosis. *Studies in Health Technology and Informatics*. 2014:52—55.

19. **Wess S., Althoff K.D., Derwand G.** Using kd Trees to Improve the Retrieval Step in Case-based Reasoning. Heidelberg: Springer, 1993:167—181.

20. **Negny S., Riesco H., Lann J.** Effective Retrieval and New Indexing Method for Case Based Reasoning: Application in Chemical Process Design. *Engineering Appl. of Artificial Intelligence*. 2010;23(6):880—894.

Сведения об авторах:

Варшавский Павел Романович — кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта НИУ «МЭИ», e-mail: VarshavskyPR@mpei.ru

Барат Вера Александровна — кандидат технических наук, доцент кафедры диагностических информационных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: BaratVA@mpei.ru

Кожевников Антон Вадимович — ассистент кафедры прикладной математики и искусственного интеллекта НИУ «МЭИ», e-mail: antoko@yandex.ru

Information about authors:

Varshavskiy Pavel R. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Applied Mathematics and Artificial Intelligence Dept., NRU MPEI, e-mail: VarshavskyPR@mpei.ru

Barat Vera A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Diagnostic Information Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: BaratVA@mpei.ru

Kozhevnikov Anton V. — Assistant of Applied Mathematics and Artificial Intelligence Dept., NRU MPEI, e-mail: antoko@yandex.ru

Работа выполнена при поддержке: РФФИ (гранты № 18-01-00459, № 18-29-03088)

The work is executed at support: RFBR (Grants No. 18-01-00459, No. 18-29-03088)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 21.11.2019

The article received to the editor: 21.11.2019