

УДК 004.75

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-475-481

## ОЦЕНКА ДЛИНЫ ПЕРИОДА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМАХ

С.А. Жмылёв

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация  
Адрес для переписки: [korg@cs.ifmo.ru](mailto:korg@cs.ifmo.ru)

### Информация о статье

Поступила в редакцию 26.02.19, принята к печати 01.04.19  
Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Жмылёв С.А. Оценка длины периода нестационарных процессов в облачных системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 3. С. 475–481. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-475-481

### Аннотация

**Предмет исследования.** Проанализированы существующие подходы к автоматическому масштабированию облачных систем, функционирующих в условиях нестационарной пользовательской нагрузки. Выявлены недостатки существующих подходов к прогнозированию нагрузки, обусловленные недостаточной производительностью используемых алгоритмов. Анализ свойств периодических нестационарных процессов и автоматическая оценка длины их периода произведены на основе измеренных данных. Точность разработанных аналитических моделей подтверждена в ходе многочисленных имитационных экспериментов в среде моделирования AnyLogic Professional. **Метод.** В основе разработанного метода автоматической оценки длины периода нестационарных процессов лежит последовательное приближение промежуточного результата к искомой величине. Предложенный метод ранжирует предполагаемые результаты в соответствии с вероятностью их соответствия определяемой величине периода нестационарного процесса. **Основные результаты.** Обеспечена возможность оценки длины периода за адекватное время. Тестирование проводилось на системе с процессором AMD FX 8120 с тактовой частотой 3,1 ГГц в один поток. Исходный сигнал генерировался с амплитудой 1. Варьировались форма сигнала, величина периода, множитель амплитуды и величина наложенного случайного шума. По данным, полученным с крупнейшего транспортного сетевого узла России «Акционерное общество «Центр взаимодействия компьютерных сетей «МСК-IX», успешно определен период суммарного транзитного трафика, а также успешно определены периоды нестационарных процессов для модели облачной системы. **Практическая значимость.** Разработанный метод может быть использован в составе сервисов автоматического масштабирования облачных систем и обеспечивает более эффективное управление инфраструктурными ресурсами облачных вычислительных систем.

### Ключевые слова

система массового обслуживания, период функции, автоматическое масштабирование, облачные системы, анализ рядов

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-475-481

## NONSTATIONARY PROCESSES PERIOD ESTIMATION IN CLOUD SYSTEMS

S.A. Zhmylev

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation  
Corresponding author: [korg@cs.ifmo.ru](mailto:korg@cs.ifmo.ru)

### Article info

Received 26.02.19, accepted 01.04.19  
Article in Russian

**For citation:** Zhmylev S.A. Nonstationary processes period estimation in cloud systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 475–481 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-475-481

### Abstract

**Subject of Research.** The existing approaches to the automatic scaling of non-stationary operating cloud systems are analyzed. The drawbacks of the existing approaches to workload prediction are revealed due to the insufficient performance of the algorithms being used. The analysis of the properties of periodic non-stationary processes and automatic length estimation of their period are performed on the basis of measured data. The accuracy of the developed analytical models was confirmed in the course of numerous simulation experiments in the AnyLogic Professional modeling environment. **Method.** The basis of the developed method of automatic length estimation of the non-stationary processes period is the consistent approximation of the intermediate result to the desired value. The proposed method ranks the expected results in accordance with the probability of their compliance with the determined period of the non-stationary process. **Main Results.** The possibility is provided to

estimate the period length for an adequate time. The testing was carried out on a system with an AMD FX 8120 CPU with a clock frequency of 3.1 GHz in one thread. The original signal was generated with amplitude 1. The waveform, the period value, the amplitude multiplier and the magnitude of the superimposed random noise were varied. According to the data from the largest transport network hub of Russia, Joint-Stock Company Center for Interaction of Computer Networks MSK-IX, the period of total transit traffic has been successfully determined, and also the periods of non-stationary processes for the cloud system model have been successfully determined. **Practical Relevance.** The developed method can be used as part of the services of cloud systems automatic scaling and provides more efficient management of the infrastructure resources of cloud computing systems.

### Keywords

queueing system, function period, auto-scaling, cloud systems, data series analysis

## Введение

В настоящее время широко распространен подход к обслуживанию пользователей, при котором вычислительная система функционирует в круглосуточном режиме работы. При этом создаваемая пользователями нагрузка имеет периодический нестационарный характер, обусловленный сменой времени суток: в ночные часы нагрузка меньше, в дневные — больше. Примерами таких систем могут служить различные онлайн-сервисы облачных вычислений, решающие типовые пользовательские задачи, например, перекодирование аудиофайлов и изображений.

Поскольку для реализации подобных интернет-сервисов используются облачные системы, перед их владельцами стоит задача оптимизации количества используемых вычислительных ресурсов. Приложения, используемые в облачных системах, по определению обладают свойством горизонтальной масштабируемости [1, 2], поэтому владельцы облачных систем в реальном времени изменяют число запущенных копий облачного приложения, адаптируя облачную систему к мгновенной пользовательской нагрузке, т.е. выполняют автоматическое масштабирование облачного приложения.

Рассмотрим типовые способы автоматического масштабирования облачных приложений. Проанализированы алгоритмы модулей автоматического масштабирования четырех наиболее распространенных систем с открытым исходным кодом: OpenStack, Apache CloudStack, HPE Eucalyptus и OpenNebula [3] с использованием косвенных признаков: интерфейса конфигурации и пользовательских параметров. Кроме того, выполнен анализ облачных систем с закрытым исходным кодом: Amazon AWS и VMware vSphere [4]. Во всех рассмотренных системах алгоритм автоматического масштабирования использует мгновенную загрузку аппаратных ресурсов в качестве условия для изменения числа запущенных копий облачного приложения (VM). В результате сформирована диаграмма активности алгоритма в нотации Unified Modeling Language (UML) (рис. 1).

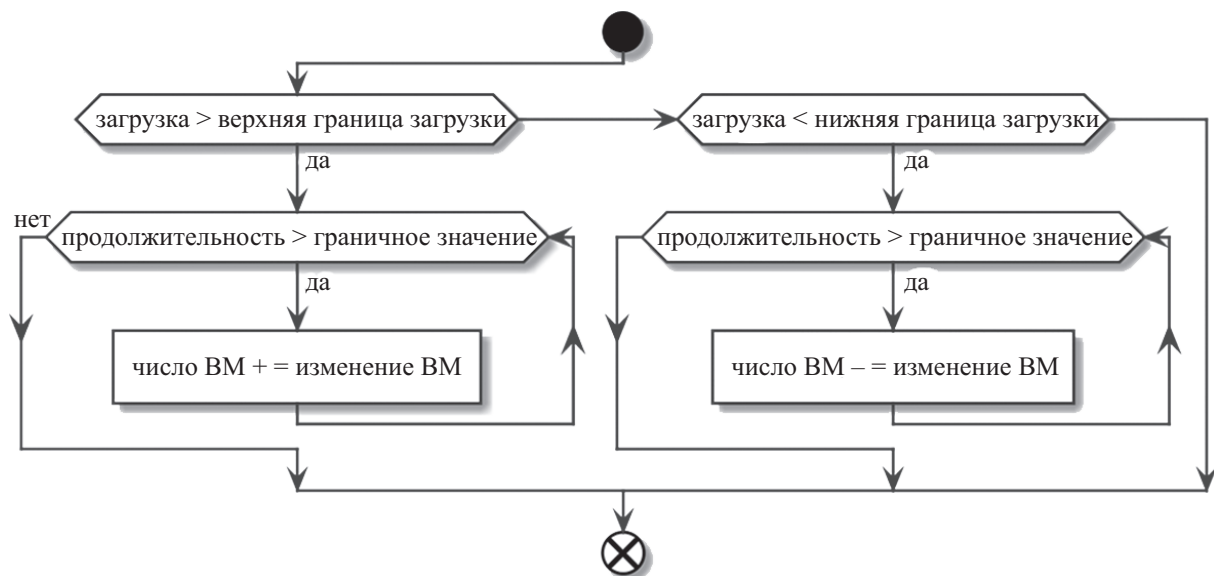


Рис. 1. UML-диаграмма активности обобщенного алгоритма автоматического масштабирования

В [5] представлен метод автоматического масштабирования, в основе которого лежит автоматическое построение аналитических моделей нагрузки от разных категорий пользователей, оптимизация аналитической модели и выбор числа запущенных копий приложения на основе прогнозной нагрузки. При этом в качестве базовой модели используется система массового обслуживания.

Один из этапов этого метода — автоматическое определение периода нестационарного процесса на основе массива измерений интервалов времени между поступлениями запросов от пользователей [6]. Поскольку широко известны методы определения периода, в частности, основанные на выделении ос-

новой гармонике и преобразовании Фурье [7, 8], разработаны для функций без разрывов и часто требуют решения дифференциальных уравнений, они не подходят для оперативной оценки величины периода дискретной пользовательской нагрузки на вычислительную систему. В работе [6] эта задача решена с помощью оригинального метода оценки длины периода нестационарных процессов, в основе которого лежит автокорреляционный алгоритм, запускаемый по мере накопления измеряемых данных. Представленный в работе метод успешно решает задачу оценки длины периода нестационарного процесса в облачной системе, однако требует существенных вычислительных затрат при обработке больших объемов анализируемых данных [9]. В частности, анализ рядов для выборки, состоящей из полутора миллиона значений, соответствующих двум неделям измерений в облачной системе, на тестовой инфраструктуре смог оценить период только после девяти дней вычислений. Подобная производительность обусловлена избыточным числом запусков алгоритма расчета функции автокорреляции [6].

В то же время при работе облачных систем в условиях динамически изменяющегося характера пользовательской нагрузки [10] необходимо обеспечить производительность, при которой оценка длины периода на том же оборудовании будет занимать минуты, в худшем случае — часы. Предлагаемый метод достигает требуемой производительности.

### Метод оценки длины периода

Пусть имеется периодическая нестационарная величина, зависящая от времени  $Y = y(t)$  с периодом  $P$ , длина которого подлежит определению. Табулируя данную величину по времени можно получить конечный ряд из  $N$  значений данной величины  $\{y_i\}_{i=0}^N = y(0), y(1), \dots, y(N-1)$ . Поскольку задача требует низкой вычислительной сложности и быстрой сходимости, в качестве базовых операций выбраны простые арифметические операции, а метод представляет собой последовательность описанных далее алгоритмов, в результате выполнения которых может быть получена величина периода  $P$ .

**Ранжирование возможных значений периода.** Если выбрать некоторую величину  $P'$  и выполнить кусочное усреднение ряда  $\{Y_i\}$  (рис. 2, а), выбирая значения с шагом  $P'$ , т. е. сформировать ряд  $\{Y'_i\}_{i=0}^{N/P'} = ((\sum_{i=0, P', 2P', \dots}^{N/P'} y(i) / (N / P')), ((\sum_{j=1, P'+1, 2P'+1, \dots}^{N/P'} y(j) / (N / P')), \dots)$ , то окажется, что при  $P' = kP$ , где  $k \in N$ , значения ряда  $\{Y'_i\}$  (рис. 2, б) будут соответствовать средним значениям функции  $y(t)$  на ее периоде. В то же время при  $P' \neq kP$ , где  $k \in N$ , значения (рис. 2, в) выстраиваются в линию.

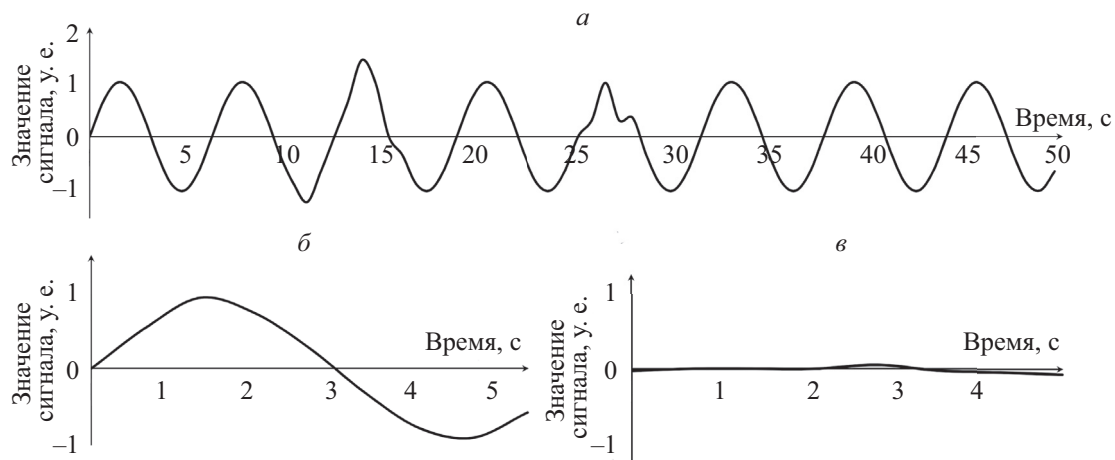


Рис. 2. Усредняемые данные (а), результаты усреднения с кратным периоду шагом 9 (б) и некратным периоду шагом 8 (в)

Пользуясь данным свойством нестационарных процессов, можно оценить величину периода по разнице между максимальным и минимальным значением усредненной функции: если предполагаемый период не кратен реальному, то результат усреднения будет стремиться к прямой линии, следовательно, разница между максимальным и минимальным значениями будет незначительна. Для такой оценки необходимо для всех значений предполагаемого периода  $P'$  вычислить разницу  $H_{P'} = \max(\{Y'_{P'}\}) - \min(\{Y'_{P'}\})$ . При этом возможный период функции  $P' \in (c_1..c_2)$ , где  $c_1$  и  $c_2$  — нижняя и верхняя границы оценки соответственно.

**Выбор точек для оценки характера функции.** В то же время, поскольку величины предполагаемых периодов могут принимать существенные значения, для вычисления  $\max(\{Y'_{P'}\})$  и  $\min(\{Y'_{P'}\})$  требуется учесть значение каждой точки в имеющейся выборке. Такой подход требует многочисленных операций с основной памятью и характеризуется низкой производительностью. Поэтому предложено для ранжирования учитывать только от десяти до трех точек усредненной функции. Обозначим число используемых для оценки точек как  $m$ . Граничные значения для  $m$  определены экспериментально. При  $m < 3$  вероятность

успешной оценки стремится к 0,5. При  $m = 10$  первичная оценка позволяет ранжировать рассматриваемый ряд так, чтобы величина гарантированно попала в первые 10 % результата. Процедура выбора конкретного значения  $m$  представлена далее.

Важным вопросом, решенным в рамках исследования, являлся выбор интервала между точками. В результате многочисленных экспериментов выявлено, что для минимизации риска оценки, при которой интервалы между рассматриваемыми точками кратны величине периода, интервалы должны иметь различные между собой значения, при этом наибольшую эффективность продемонстрировали интервалы, соответствующие простым числам (дополненным значением 1), отмасштабированные к величине предполагаемого периода. Например, если предполагаемый период  $P' = 27$ , и принято решение анализировать функцию по  $m = 4$  точкам, то требуется три интервала, что соответствует интервалам между первыми четырьмя простыми числами: (1, 2, 3, 5). При этом, масштабируя их к периоду, необходимо рассчитать шаг как  $S = P'/\sum_{i=1,2,3} i = 4,5$ , а затем умножить  $S$  на декрементированные значения интервалов. Используемые для дальнейшей оценки значения усредненной функции при  $P' = 27$ : (0, 4, 9, 18) определяются округлением результата умножения.

**Выбор граничных значений величины  $P'$ .** Поскольку процессы, протекающие в реальных системах, характеризуются высокой степенью случайности [11, 12], для нивелирования случайных выбросов функции необходимо максимизировать число интервалов кусочного усреднения (минимизировать величину  $c_2$ ). В то же время ввиду специфики реально функционирующих систем [13], необходимо обеспечить условия, при которых успешно оценивается период в один день для недельного ряда измерений. Поэтому величину  $c_2$  целесообразно выбирать как длину исходного ряда  $N/6$ , что гарантирует вхождение  $N/7$  (соответствующего одному дню в неделю) во множество возможных значений  $P'$ . Этот факт также позволяет сделать вывод, что предполагаемый период должен как минимум шесть раз укладываться в ряд измеренных данных, что далее используется для расчета  $c_1$ .

Выбор нижней границы зависит от используемого способа выбора интервалов для кусочного усреднения. При использовании интервалов на основе простых чисел, величина  $c_1$  может быть определена как  $c_1 = 6 \sum_{i=1}^m \Psi(i)$ , где  $\Psi(i)$  — функция, возвращающая  $i$ -ое по счету простое число. Если в ходе определения нижней границы окажется, что  $c_1 > N$ , необходимо уменьшить и повторить оценку нижней границы. Уменьшать величину  $m$  имеет смысл для всех значений  $m > 2$ .

Первичная оценка предполагаемых периодов. После выбора точек для оценки характера функции и граничных значений для величины предполагаемого периода можно на основе исходного ряда  $\{Y_i\}_{i=0}^N$  сформировать таблицу «ключ-значение»  $D$ , где в качестве ключа используется величина предполагаемого периода  $P'$ , а в качестве значения — величина  $H_{P'}$ . На следующем шаге требуется сформировать перечень значений  $\{B\}$ , не являющихся периодами функции. Изначально предполагается, что  $\{B\} = \emptyset$ .

Для завершения первичной оценки требуется в цикле выполнять следующие шаги.

Шаг 1. Исключить из  $D$  все записи по ключам, содержащимся в  $\{B\}$ .

Шаг 2. Если  $D$  не содержит записей, выйти из цикла. В случае, если к этому моменту оценка величины периода не дала результата, то завершить все вычисления, сделав вывод, что не удалось определить период.

Шаг 3. Ранжировать записи  $D$  по значениям в порядке убывания. В случае одинаковых значений для различных ключей — ранжировать по величинам ключей в порядке возрастания.

Шаг 4. Выбрать первую запись  $D_1$  из  $D$  и выполнить описанную далее детальную проверку по среднеквадратическому отклонению, в результате которой можно сделать вывод, может ли величина  $D_1$  являться периодом исходной функции или быть кратной ему. Если проверка оказалась неудачной, то величину  $D$ , а также все кратные ей значения необходимо поместить в  $\{B\}$  и перейти к следующей итерации цикла. В противном случае, выйти из цикла, предполагая, что  $D_1$  кратна периоду исходной функции.

На выходе из первого цикла необходимо сформировать множество значений  $\{F\}$ , кратных  $D_1$ , не содержащихся в  $\{B\}$ , и ранжировать это множество по возрастанию. Затем, по ранжированному множеству в цикле выполнить детальные проверки по среднеквадратическому отклонению и по суммарным значениям, описанным далее. Если для всех значений  $\{F\}$  проверки дали отрицательный результат, то необходимо величину  $D_1$  и все кратные ей значения поместить в  $\{B\}$  и вернуться на шаг 1 первого цикла. В то же время, если результаты обеих проверок для некоторого проверяемого значения  $P_F$  из ряда  $\{F\}$  положительны, то величина  $P_F$  соответствует искомому периоду функции. Сформирована обобщенная диаграмма активности алгоритма поиска периода в нотации UML (рис. 3).

**Детальная проверка по среднеквадратическому отклонению** основывается на том, что для предполагаемого периода  $P'$ , а также величин  $P' - 1$  и  $P' + 1$  вычисляются суммы среднеквадратических отклонений периодических повторяющихся точек:  $sq_{(P')}$ ,  $sq_{(P'-1)}$  и  $sq_{(P'+1)}$  соответственно. Рассматриваемое множество  $\{Y_i\}$  разделяется на подмножества в соответствии с проверяемым значением периода. Например, пусть рассматриваемое множество  $\{Y_i\} = y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9$ , тогда для предполагаемого периода  $P' = 3$  величина  $sq_{(P')}$  будет рассчитана как сумма среднеквадратических отклонений следующих множеств:  $\{y_1, y_4, y_7\}$ ,  $\{y_2, y_5, y_8\}$  и  $\{y_3, y_6, y_9\}$ . Основываясь на свойстве нестационарности (рис. 2), проверка считается пройденной успешно, если  $sq_{(P')} < sq_{(P'-1)} < sq_{(P'+1)}$ , и, поскольку для  $P' = kP$  периодически повторяющиеся значения функции будут иметь меньший разброс относительно друг друга.



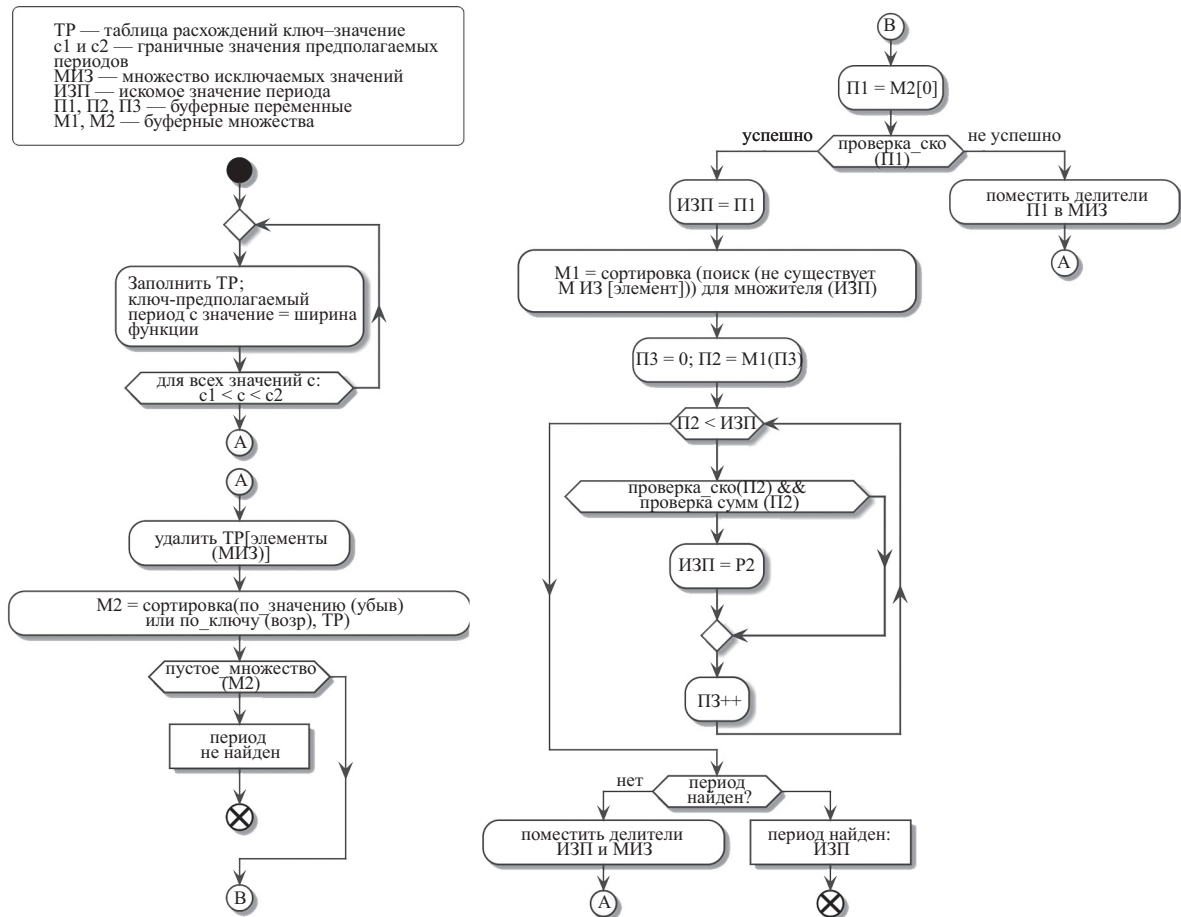


Рис. 3. UML-диаграмма активности алгоритма поиска периода

**Детальная проверка по суммарным значениям** по аналогии с предыдущей основывается на расчете трех величин  $sum_{(P)}$ ,  $sum_{(P-1)}$  и  $sum_{(P+1)}$ , при этом каждая величина рассчитывается следующим образом. Выбираются и усредняются периодически повторяющиеся значения исходного множества. Например, пусть рассматриваемое множество  $\{Y_i\} = y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8, y_9$ , тогда для проверки предполагаемого периода  $P'=3$  величина  $sum_{(P)}$  потребует усреднения следующих множеств:  $s_1 = \{y_1, y_4, y_7\}$ ,  $s_2 = \{y_2, y_5, y_8\}$  и  $s_3 = \{y_3, y_6, y_9\}$ . Результат такого усреднения — средние значения функции на периоде:  $\bar{s}_1$ ,  $\bar{s}_2$  и  $\bar{s}_3$ . Затем определяется среднее арифметическое  $\bar{s}$  этих значений и результирующая сумма  $sum_{(P)}$  рассчитывается как  $sum_{(P)} = \sum_{i=1,2,3} |\bar{s}_i - \bar{s}|$ . Проверка считается пройденной успешно, если  $sum_{(P)} > sum_{(P-1)}$  и  $sum_{(P)} > sum_{(P+1)}$ .

### Результаты и практическая значимость

Для проверки точности метода разработана программа, запускающая алгоритмы с различными наборами параметров. Тестирование проводилось на системе с процессором AMD FX 8120 с тактовой частотой 3,1 ГГц в один поток. Исходный сигнал генерировался с амплитудой 1. Варьировались форма сигнала (синусоида, косинусоида, синусоида с отрицательной фазой, пилообразная, меандр, прямоугольная со скважностью 2,33, треугольная и линейная), величина периода (от 1 до 140), множитель для амплитуды (от 1 до 7) и амплитуда наложенного случайного шума (от 0 до 0,7).

В ходе многочисленных экспериментов для линейного и стационарного сигналов не получилось успешно оценить величину периода ни в одном из случаев. Во всех экспериментах результат оценки соответствовал верхней границе предполагаемого периода, что позволяет сделать вывод о низкой эффективности метода для анализа непериодических сигналов. Процент ошибок для остальных форм сигнала имеет одинаковое значение, что свидетельствует о том, что в среднем метод дает одинаковые результаты для различных форм сигналов и это обусловлено ошибками, возникающими при оценке периодов, выходящих за область применения метода. Как при незначительных значениях периода  $P < 4$ , так и при существенных  $P > 100$ , имеют место ошибки оценки (таблица).

Первые обусловлены алгоритмическими ограничениями используемых подходов, тогда как вторые — недостаточной плотностью исходных данных, поскольку с увеличением величины предполагаемого периода требуется больше данных для повышения точности оценки за счет выполнения детальных проверок. При

Таблица. Число ошибок в зависимости от длины периода

Длина периода, число отчетов	Корректная оценка, шт	Кратные периоду ошибки, шт	Прочие ошибки, шт
Нет	5	0	175
2	25	0	38
3	58	0	5
4	63	0	0
5	63	0	0
6	63	0	0
8	63	0	0
10	63	0	0
12	56	7	0
120	32	31	0
121	63	0	0
122	25	38	0
140	30	22	11

этом для значений  $3 < P < 140$  ошибки обусловлены сложной формой сигнала (прямоугольный сигнал) и не проявлялись для симметричных сигналов, характерных для облачных систем. Программная реализация метода позволила безошибочно определять период данных о сетевой активности, полученных с крупнейшего транспортного сетевого узла России «Акционерное общество «Центр взаимодействия компьютерных сетей «МСК-IX» [14]. В результате можно сделать вывод, что метод имеет достаточную точность для применения в вычислительных системах и управляющих моделях облачных систем [15].

В то же время в тестовой среде анализ полуторамиллионного ряда значений завершился за  $6,5 \pm 0,2$  минут. В первую очередь это позволяет повысить точность оценки за счет многократного запуска алгоритмов и усреднения полученных результатов, а также за удовлетворительное время обрабатывать двухнедельные измерения, сделанные на облачной системе, что решает задачу быстрого поиска периода для метода автоматического масштабирования [6].

## Заключение

Предлагаемый численный метод позволяет быстро оценивать длину периода нестационарных процессов с помощью свойства нестационарности. По данным, полученным с крупнейшего транспортного сетевого узла России, успешно определен период суммарного транзитного трафика, а также успешно определены периоды нестационарных процессов для модели облачной системы.

## Литература

1. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A., Poptcova N.A., Bogatyrev A.V. Efficiency of redundant service with destruction of expired and irrelevant request copies in real-time clusters // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. V. 678. P. 337–348. doi: 10.1007/978-3-319-51917-3\_30
2. Patel R.P. Cloud computing and virtualization technology in radiology // *Clinical Radiology*. 2012. V. 67. N 11. P. 1095–1100. doi: 10.1016/j.crad.2012.03.010
3. Moreno-Vozmediano R., Montero R.S, Llorente I.M. IaaS cloud architecture: from virtualized datacenters to federated cloud infrastructures // *Computer*. 2012. V. 45. N 12. P. 65–72. doi: 10.1109/mc.2012.76
4. Chang B.R., Tsai H.F., Chen C.M. Empirical analysis of server consolidation and desktop virtualization in cloud computing // *Mathematical Problems in Engineering*. 2013. V. 2013. 11 p. doi: 10.1155/2013/947234
5. Мартынчук И.Г., Жмылёв С.А. Архитектура и организация сервисов автомасштабирования в облачных системах // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. 2017. Т. 5. С. 200–203.
6. Жмылёв С.А., Мартынчук И.Г., Киреев В.Ю., Алиев Т.И. Оценка длины периода нестационарных процессов в облачных системах // *Известия вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61. № 8. С. 645–651. doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-8-645-651

## References

1. Bogatyrev V.A., Parshutina S.A., Poptcova N.A., Bogatyrev A.V. Efficiency of redundant service with destruction of expired and irrelevant request copies in real-time clusters. *Communications in Computer and Information Science*, 2016, vol. 678, pp. 337–348. doi: 10.1007/978-3-319-51917-3\_30
2. Patel R.P. Cloud computing and virtualization technology in radiology. *Clinical Radiology*, 2012, vol. 67, no. 11, pp. 1095–1100. doi: 10.1016/j.crad.2012.03.010
3. Moreno-Vozmediano R., Montero R.S, Llorente I.M. IaaS cloud architecture: From virtualized datacenters to federated cloud infrastructures. *Computer*, 2012, vol. 45, no. 12, pp. 65–72. doi: 10.1109/mc.2012.76
4. Chang B.R., Tsai H.F., Chen C.M. Empirical analysis of server consolidation and desktop virtualization in cloud computing. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, vol. 2013, 11 p. doi: 10.1155/2013/947234
5. Martynchuk I.G., Zhmylev S.A. Architecture and organization of autoscaling services in cloud systems. *Al'manakh Nauchnykh Rabot Molodykh Uchenykh Universiteta ITMO*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2017, vol. 5, pp. 200–203. (in Russian)
6. Zhmylev S.A., Martynchuk I.G., Kireev V.Yu., Aliev T.I. Estimation of periods of nonstationary processes in cloud systems. *Journal of Instrument Engineering*, 2018, vol. 61, no. 8, pp. 645–651 (in Russian). doi: 10.17586/0021-3454-2018-61-8-645-651

7. Cattani C., Kudreyko A. Application of periodized harmonic wavelets towards solution of eigenvalue problems for integral equations // *Mathematical Problems in Engineering*. 2010. 8 p. doi: 10.1155/2010/570136
8. Chen W.W., Liu S., Wang Q.J. Fast Fourier transform based numerical methods for elasto-plastic contacts of nominally flat surfaces // *Journal of Applied Mechanics*. 2008. V. 75. N 1. doi: 10.1115/1.2755158
9. Левина А.Б., Таранов С.В. Исследование влияния сложности функции кодирования на распределение вероятности маскировки ошибки // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 2. С. 331–337. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-331-337
10. Bogatyrev V.A. Fault tolerance of clusters configurations with direct connection of storage devices // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2011. V. 45. N 6. P. 330–337. doi: 10.3103/S0146411611060046
11. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Golubev I.Yu. Optimization and the process of task distribution between computer system clusters // *Automatic Control and Computer Sciences*. 2012. V. 46. N 3. P. 103–111. doi: 10.3103/S0146411612030029
12. Письмак А.Е., Харитонов А.Е., Цопа Е.А., Клименков С.В. Оценка семантической близости предложений на естественном языке методами математической статистики // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2016. Т. 16. № 2. С. 324–330. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-324-330
13. Shahzad A., Lee Y.S., Lee M. et al. Real-time cloud-based health tracking and monitoring system in designed boundary for cardiology patients // *Journal of Sensors*. 2018. V. 2018. 15 p. doi: 10.1155/2018/3202787
14. Суммарный трафик участников, передаваемый через MSK-IX [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.msk-ix.ru/traffic/> (дата обращения: 09.04.2019).
15. Беззатеев С.В., Елина Т.Н., Мылников В.А. Моделирование процессов подбора параметров облачных систем для обеспечения их устойчивости с учетом надежности и безопасности // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2018. Т. 18. № 4. С. 654–662. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-654-662
7. Cattani C., Kudreyko A. Application of periodized harmonic wavelets towards solution of eigenvalue problems for integral equations. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010, 8 p. doi: 10.1155/2010/570136
8. Chen W.W., Liu S., Wang Q.J. Fast Fourier transform based numerical methods for elasto-plastic contacts of nominally flat surfaces. *Journal of Applied Mechanics*, 2008, vol. 75, no. 1. doi: 10.1115/1.2755158
9. Levina A.B., Taranov S.V. Investigation of influence of encoding function complexity on distribution of error masking probability. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 331–337 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-331-337
10. Bogatyrev V.A. Fault tolerance of clusters configurations with direct connection of storage devices. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2011, vol. 45, no. 6, pp. 330–337. doi: 10.3103/S0146411611060046
11. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Golubev I.Yu. Optimization and the process of task distribution between computer system clusters. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, vol. 46, no. 3, pp. 103–111. doi: 10.3103/S0146411612030029
12. Pismak A.E., Kharitonova A.E., Tsopa E.A., Klimenkov S.V. Evaluation of semantic similarity for sentences in natural language by mathematical statistics methods. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 2, pp. 324–330. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-2-324-330
13. Shahzad A., Lee Y.S., Lee M. et al. Real-time cloud-based health tracking and monitoring system in designed boundary for cardiology patients. *Journal of Sensors*, 2018, vol. 2018, 15 p. doi: 10.1155/2018/3202787
14. MSK-IX Traffic. Available at: <https://www.msk-ix.ru/traffic/> (accessed: 09.04.2019).
15. Bezzateev S.V., Elina T.N., Myl'nikov V.A. Modeling of selection processes of cloud systems parameters providing their stability in accordance with reliability and safety. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 654–662 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-4-654-662

### Авторы

**Жмылёв Сергей Александрович** — ассистент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-8916-5474, [korg@cs.ifmo.ru](mailto:korg@cs.ifmo.ru)

### Authors

**Sergey A. Zhmylev** — Assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-8916-5474, [korg@cs.ifmo.ru](mailto:korg@cs.ifmo.ru)