

DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.7

УДК 519.248

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА НАДЁЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ю. В. Васильков<sup>1</sup>, А. В. Тимошенко<sup>2</sup>, В. А. Советов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ярославский государственный технический университет,  
150023, Ярославль, Московский проспект, 88

<sup>2</sup> АО «Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца»,  
127083, Москва, ул. 8 марта, 10-1

<sup>3</sup> Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,  
150001, Ярославль, Московский проспект, 28

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2020 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается задача краткосрочного прогнозирования работоспособности радиотехнической системы на основе информации, получаемой в процессе её функционирования. Для формирования диагностической информации формируется один временной ряд, значение которого в различные моменты времени определяется суммой отказов всей системы и отдельных её составляющих. Анализ такого скалярного ряда позволит существенно сократить время диагностирования возможных отказов. Обработка этого диагностического ряда в целях получения необходимой информации о состоянии системы и её отдельных частей осуществляется с использованием спектрального анализа и частотной цифровой фильтрации. В статье показана возможность выделения из общего интегрированного ряда различных составляющих: линейной и гармонической (из синусоидальных составляющих и прямоугольных импульсов) трендов, что позволяет сократить число анализируемых каналов информации, повысить оперативность формирования информации о состоянии системы и надёжность краткосрочного прогноза. Проведена оценка влияния числа точек временного ряда, коэффициента автокорреляции значений ординат временного ряда, наличия отдельных различных коротких гармонических составляющих и возможность их выделения из интегрального диагностического временного ряда. Даны рекомендации по организации краткосрочного прогнозирования исследуемых

составляющих диагностического ряда.

**Ключевые слова:** временной ряд, диагностический ряд, спектральный анализ, частотная фильтрация, прогнозирование, гармонические и линейные тренды.

**Abstract.** The work is devoted to the problem of short-term forecasting of the operability of a radio engineering system based on information obtained in the process of its functioning. To generate diagnostic information, one time series is formed, the value of which at various points in time is determined by the sum of failures of the entire system and its individual components. The analysis of such a scalar series will significantly reduce the time for diagnosing possible failures. Processing this diagnostic series in order to obtain the necessary information about the state of the system and its individual parts is carried out using spectral analysis and frequency digital filtering. The article shows the possibility of isolating trends from the general integrated series of various components: linear and harmonic (from sinusoidal components and rectangular pulses) trends, which reduces the number of analyzed information channels, improves the efficiency of generating information about the state of the system and the reliability of short-term forecasting. The influence of the number of points in the time series, the autocorrelation coefficient of the ordinates of the time series, the presence of separate various short harmonic components, and the possibility of their separation from the integral diagnostic time series are estimated. Recommendations for the organization of short-term forecasting of the investigated components of the diagnostic series are given.

**Keywords:** time series, diagnostic series, spectral analysis, frequency filtering, forecasting, harmonic and linear trends.

### **Цель исследования и постановка задачи**

В настоящее время вопросы оценки эффективности функционирования сложных систем являются актуальными в связи с ростом сложности таких систем, высокой значимости прогнозов их технического состояния. Поэтому им уделяется значительное внимание [1]. Многие работы направлены на обеспечение высокой надёжности при проектировании изделий, и недостаточно

уделяется внимание надёжности в условиях их реальной эксплуатации. Во многом это связано с большим количеством составных частей (блоков, узлов, элементов) таких систем и многообразием технических и информационных связей между ними. Всё это вызывает лавинообразный рост количества исследуемых характеристик, влияющих на надёжность работы всей системы.

Одним из путей повышения итоговой эффективности функционирования оборудования системы является развитие внутриблоковой диагностики состояния отдельных устройств и их подсистем, что может, несмотря на существенный рост перерабатываемой информации, облегчить анализ надёжности всей системы.

При анализе работоспособности важную роль играет учёт наличия стохастической составляющей в проявлении отказов, которая существует всегда и зависит от множества часто неизвестных причин, на которые в свою очередь могут оказывать влияние условия эксплуатации (температура и влажность окружающей среды, режимы работы и пр.), обслуживание оборудования системы (квалификация персонала, условия ремонта и пр.), а также и «естественное старение» технической системы. Да и детерминированные составляющие временного ряда отказов тоже нередко обуславливаются случайными во времени причинами, что приводит к непостоянной длительности составляющей во временном ряду, появлению трендов разной продолжительности, что не всегда легко выявить и учесть.

Все эти факторы невозможно в полной мере учесть при проектировании, производстве системы, её приёмочных испытаний. Они нередко анализируются на специальных стендах, в «лабораторных условиях», что, конечно не заменяет полностью условий реальной эксплуатации изделия. Во время таких испытаний оцениваются некоторые важные параметры системы, которые, естественно, получены по выборке (что всегда имеет место при наличии стохастической составляющей в результатах испытаний), но их впоследствии представляют как значение параметра системы, а не как его оценку (которая, как известно, обладает некоторыми границами доверительных интервалов [2 - 4]). Очевидно,

что такой способ оценки параметров без учёта стохастичности реальной системы и её условий функционирования будет негативно влиять на результаты прогноза работоспособности всей системы.

В данной работе сделана попытка получать необходимую информацию о состоянии сложной системы с использованием интегрального диагностического ряда, в некоторой степени интегрального подхода, учитывающего как отказы отдельных частей системы, так и всей системы при сокращении числа информационных каналов обработки информации. Последнее важно в случае высокой надежности анализируемой системы, т.е. при сравнительно небольшом общем числе отказов и имеющихся реальных данных. Существование различных подходов к модельному анализу системы как на основе полностью формальных моделей со своими достоинствами и недостатками, так и на основе содержательного анализа явлений с возможностью их оперативного устранения (тоже со своими достоинствами и недостатками) приводит к различной эффективности прогнозов в заданных интервалах времени [5, 6].

В условиях высокой надёжности отдельных составляющих всей системы сбои отдельных узлов могут быть редкими и даже очень редкими. Поэтому выборка не даёт приемлемых качественных числовых характеристик, необходимых для прогноза значений параметров, особенно краткосрочных. Обычно надёжностные характеристики получают в течение длительного времени, т.к. ожидаемые статистические характеристики близки к истинным в качестве средних. Другими словами, чтобы получить надёжные характеристики случайных отказов, например, за 6 месяцев, нужно провести испытания по крайней мере за период раз в 8-10 длиннее, чем требуется для указанного периода времени. Полученные оценки будут характеризовать значения искомых параметров в среднем при большом объёме реализаций случайных процессов.

В итоге получается, что во время длительной реальной эксплуатации очень трудно собрать необходимые статистические данные для оперативных оценок актуальных параметров радиотехнической системы, а периодический

краткосрочный анализ работоспособности системы может позволить получать более точные данные за меньший интервал времени.

### **Анализ инструмента исследования**

Для получения оперативных данных по надёжности, работоспособности всей системы в целом в режиме реальной эксплуатации можно предложить следующий подход.

Примем в качестве допущения предположение, что исследуемая система обладает свойством эргодичности, несмотря на разнородность отдельных элементов и блоков. Наличие допущения об эргодичности приводит к тому, что последовательное наблюдение за множеством таких процессов можно заменить наблюдением за всеми процессами в один отрезок времени. Конечно, предположение об эргодичности нужно доказывать, но для упрощения комплексного исследования системы его можно принять как допущение на основе анализа существующих аналогов. Кроме того, наличие такого допущения имеет и другую особенность: прогноз будет всегда иметь погрешность в силу постоянного наличия случайной составляющей, поэтому принятие допущения об эргодичности, существенно облегчающего оценку надёжностных параметров системы в реальном времени эксплуатации, может способствовать получению очень краткосрочного прогноза быстро и эффективно. При этом нужно помнить, что долгосрочное предсказание эргодических систем невозможно — небольшая ошибка измерений может привести к серьёзному расхождению реальной траектории с предсказанной. Однако в рассматриваемом случае, когда ставится задача очень краткосрочного прогноза (например, 1-3 часа) при достаточно большом времени анализа информации (4-6 месяцев) о реальном состоянии системы, можно принять такое допущение априори без доказательства.

### **Формирование диагностического ряда**

Можно сформировать различные временные ряды для характеристики надёжности системы. Наиболее приемлемым для оперативного формирования информации по отказам можно считать ряд с фиксированными интервалами

времени, в которые подсчитываются реальные отказы, как дискретные (количество простоев, время для ликвидации простоев и пр.), так и аналоговые, связанные с плавным изменением отдельных параметров внутри допустимого диапазона их изменения, параметров окружающей среды (температуры, влажности и пр.). В условиях реальной эксплуатации всей системы получим характеристику отказов не одного элемента или блока, а всей системы (можно считать, что все элементы работают в схожих внешних условиях).

В целом получим для исследования временной диагностический ряд, содержащий  $N$  временных интервалов, характеризующих отказы  $P$  отдельных блоков. В среднем полученный ряд можно считать характеристикой всей системы, т.е. временной ряд отказов можно рассматривать как для всей системы, так и для отдельного блока (элемента).

Итогом реального мониторинга системы является временной диагностический ряд, включающий в себя: анализируемые характеристики «сбоев» системы, дискретные отказы с ремонтами, «плавные отказы» (изменение характеристик) с учётом корреляционных связей между подсистемами, блоками и элементами, т.е. всё, что фиксируется и полезно для анализа работоспособности системы.

Общая задача оперативного анализа временного ряда, способствующего формированию краткосрочного прогноза, должна включать в себя следующие стадии.

1. Накопление информации о характеристиках системы.
2. Выделение во временном диагностическом ряду регулярных детерминированных и случайной составляющих ряда на анализируемом интервале времени.
3. Поиск ключевых (корневых) причин идентифицированных регулярных составляющих и, в случае возможности, их ликвидация.
4. Прогноз на заданный (в соответствии с рассматриваемым классом задач - небольшой) промежуток времени ( $T_1$ ) по детерминированным составляющим с оценкой гарантированного доверительного интервала по

случайной составляющей.

5. Оценка прогноза путём сравнения с реальным процессом, т.е. оценка правильности действия по устранению выявленных трендов.

6. Коррекция прогнозной модели (обучение) путём устранения корневых причин детерминированных трендов (линейного и периодического)

7. Оценка вероятности прогноза после корректирующих мероприятий, которую необходимо иметь, чтобы учитывать наличие случайности, оценка стабильности серии прогнозов.

8. Возврат на этап 1, если есть запас времени для начала заданного временного интервала прогноза.

9. Прогноз на заданный интервал времени и переход на этап 1.

Таким образом, прогнозирование на следующий интервал времени в рассматриваемом случае осуществляется во время работы системы. Если система «старееет», то можно выявить и скорректировать, по мере возможности, причины возникновения отказов.

Важной является случайная составляющая. Если она мала (по амплитуде), то проблемы с выделением детерминированных трендов резко упрощаются. Однако сильно зашумлённые временные ряды (детерминированные составляющие существенно меньше, чем среднеквадратичное отклонение случайной) представляют больший интерес для исследования. Далее в статье все составляющие, кроме линейного тренда, считаются центрированными.

Таким образом, источником анализа состояния работоспособности системы в данной статье является временной диагностический ряд, фиксирующий состояние всей системы и её составляющих. Далее рассмотрим некоторые особенности обработки диагностического ряда для выявления состояния системы и его причин.

### **Анализ «локальных» проблем при выделении различных возможных трендов**

При реализации каждого этапа общего анализа временного ряда есть свои особенности и локальные «проблемы» (подзадачи). Рассмотрим основные из

них.

### 1. Накопление информации о характеристиках системы

На этом этапе важно определить целесообразный период квантования данных (квант времени) и, как следствие, количество точек  $N$  в анализируемом ряду. При большом  $N$  могут быть большие трудозатраты по времени на анализ ряда, а при малом – возможны потери информации за счёт усечённого ряда при проведении анализа (например, при использовании наиболее эффективных инструментов анализа особенностей временного ряда – вычислении корреляционной функции и спектральной плотности).

Подбирать квант времени для формирования временного диагностического ряда следует с учётом результатов предварительных стендовых испытаний системы или натурных испытаний прототипа системы, на которых можно оценить примерные интервалы времени выявления отказов различных блоков системы. С одной стороны, слишком маленькие интервалы (кванты) фиксации отказов могут привести к большому количеству «пустых» квантов, где не произошло ни одного отказа. А большие могут привести к избыточному количеству суммарных отказов, которые исказят содержание временного ряда. Поэтому целесообразно выявлять оптимальные интервалы времени фиксации отказов для их регистрации с учётом конкретных условий надёжности системы.

Значением временного ряда в каждый квант времени можно считать сумму отказов всех подсистем в этом интервале или время длительности суммарного отказа различных блоков и пр. Такой подход, с одной стороны, не позволяет очень оперативно выявлять дефектные блоки, узлы, элементы, что в определённой мере затрудняет анализ системы. А с другой стороны, «скалярный» временной ряд значительно легче и быстрее подвергается обработке и анализу для всей системы в целом, в то время как штатные подсистемы контроля работоспособности отдельных блоков могут быть проанализированы дополнительно с учётом информации, получаемой от анализа всей системы как единого целого.

Обрабатываемый диагностический временной ряд предварительно нужно центрировать, т.е. привести математическое ожидание ряда к нулю. Результатом такого преобразования помимо нулевого математического ожидания будет превращение значений ряда из целочисленных (в случае учёта суммы отказов в каждый квант времени) в вещественные. При этом «дробные» количества отказов временно для исследований (на период анализа) можно оставить, т.е. при центрировании ординат ряда применять обычное деление вместо целочисленного.

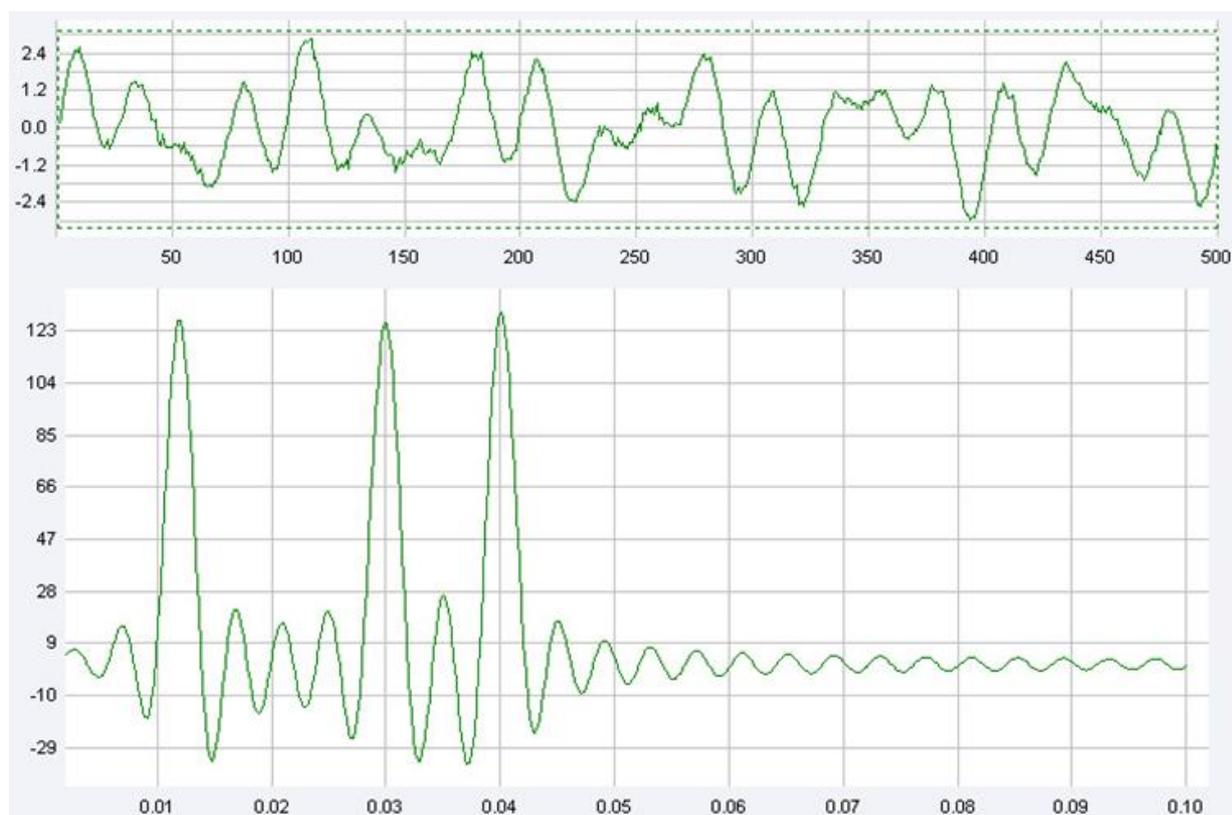


Рис. 1. Спектральный анализ анализируемого временного ряда с низкими шумами (вверху – исходный временной ряд, внизу – спектральная характеристика временного ряда).

На рисунке 1 приведён центрированный временной ряд, сформированный из трёх гармонических составляющих с различными частотами единичной амплитуды и случайной составляющей с низкой дисперсией 0,01 приведённым выше способом (т.е. ординаты временного ряда являются суммой отказов трёх различных блоков в каждый момент времени). Все графические результаты анализа в статье получены с помощью авторской программы QStat-methods [5].

Из спектральной характеристики чётко видно наличие отдельных трёх гармонических составляющих, которые визуально выделить во временном ряду практически невозможно, несмотря на очень маленькую случайную составляющую.

На рисунке 2 приведены выделенные рекурсивными цифровыми фильтрами Баттеруорта 8 порядка [7 - 8] гармонические составляющие, которые практически совпадают по частоте с заложенным в ряд и отличаются от них амплитудой. Последнее обусловлено числовым способом вычисления спектральной характеристики временного ряда.

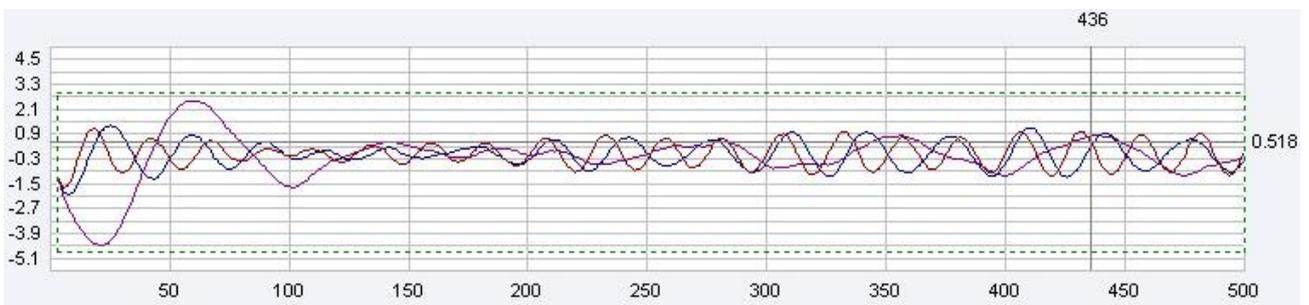


Рис. 2. Выделенные из исходного ряда 3 гармонические составляющие.

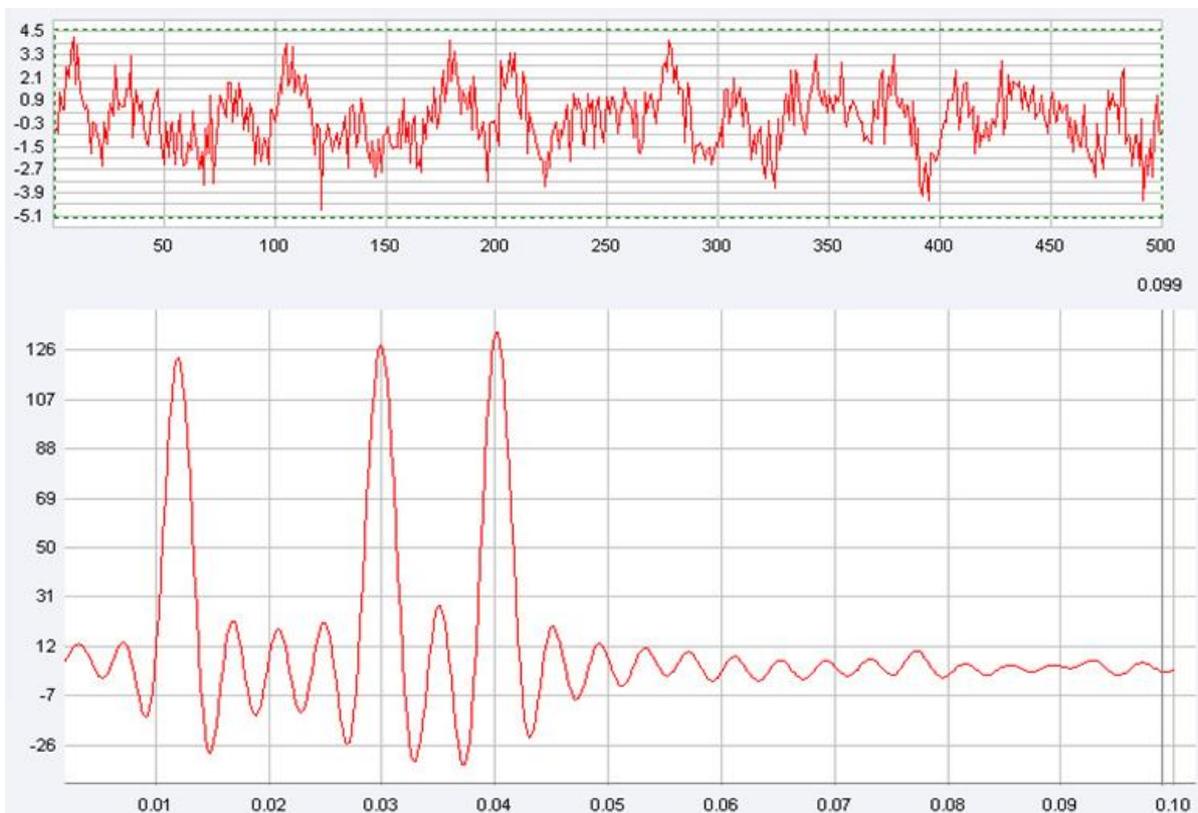


Рис. 3. Спектральный анализ временного ряда с высокими шумами.

Из графиков на рисунке 3 отчётливо видно наличие тех же трёх

гармонических составляющих в сильно зашумлённом (дисперсия случайной составляющей равна 1) ряду, что подтверждает возможность выделения гармонических составляющих в сильно зашумлённых рядах, ординаты которых получены суммированием числа отказов различных блоков в каждый интервал времени наблюдения за системой.

## 2. Выделение регулярных детерминированных и случайной составляющих ряда

На этом этапе для выделения линейного и гармонического трендов можно воспользоваться методами, представленными в работе [9]. Метод анализа линейного тренда позволяет выделять не один тренд во всем зашумлённом временном ряду, а определять каждый тренд: его начало, конец и угол наклона.

На рисунке 4 приведён пример выделения линейного переменного тренда из временного ряда, построенного с применением приведённого в [9] алгоритма.

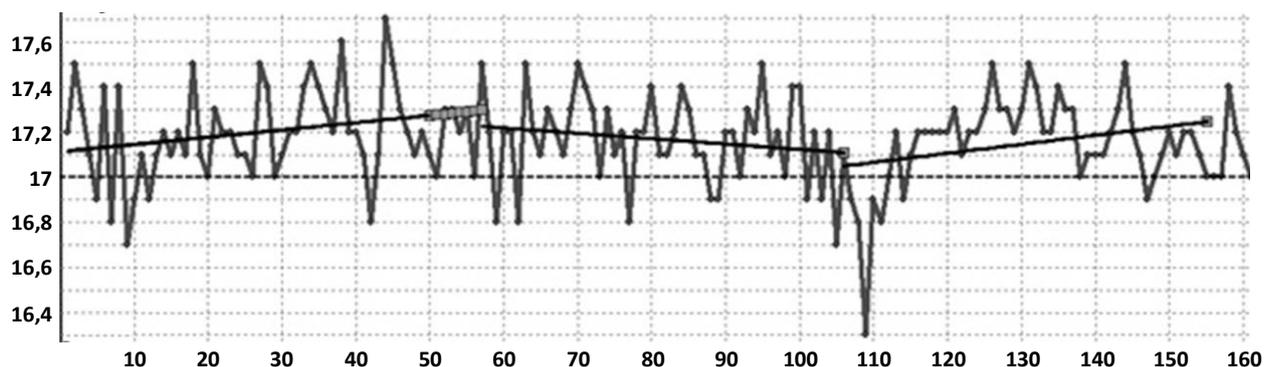


Рис. 4. Выделение линейного тренда из зашумлённого ряда.

Анализ гармонических трендов эффективно можно осуществлять с использованием спектрального анализа, который показывает частоты с наиболее высокими энергетическими характеристиками гармонических колебаний. Этот инструмент позволяет выделять не только синусоидальные составляющие, но и гармонические прямоугольные различной скважности. Кроме этого, он может выделять и отдельные прямоугольные импульсы конечной длительности. Причём он способен выделить эти колебания не только на всем протяжении ряда, но и на отдельных его отрезках. К сожалению, при восстановлении функций гармонических составляющих на стыках гармонических трендов между собой и с участками отсутствия трендов

наблюдаются их искажения (см. рисунок 5).



Рис. 5. Вид временного ряда и его спектрограммы с незначительным непрерывным линейным трендом.

В отличие от спектрального анализа, методы сглаживания не позволяют выделить несколько одновременных гармонических составляющих.

В случае плавных отказов, связанных с постепенным изменением рабочих характеристик, обусловленных, например, изменением температуры элементов системы, естественного старения и т.п. временной ряд может содержать непрерывный линейный тренд во всем интервале наблюдения. Его легко заметить на спектрограмме анализируемого временного ряда по значению ординаты при нулевой частоте (см. рисунок 6).



Рис. 6. Вид исходного временного ряда и выделенного линейного тренда.

### *Исследование влияния количества точек ряда на способность выделения трендов*

Ниже на рисунке 7 показано влияние числа точек во временном ряду на точность выделения гармонического тренда. Очевидно, что в исследованных пределах (отличие в 8 раз: от 250 до 2000, хотя время обработки ряда существенно различается) не выявлено существенного влияния числа точек на точность выделения.

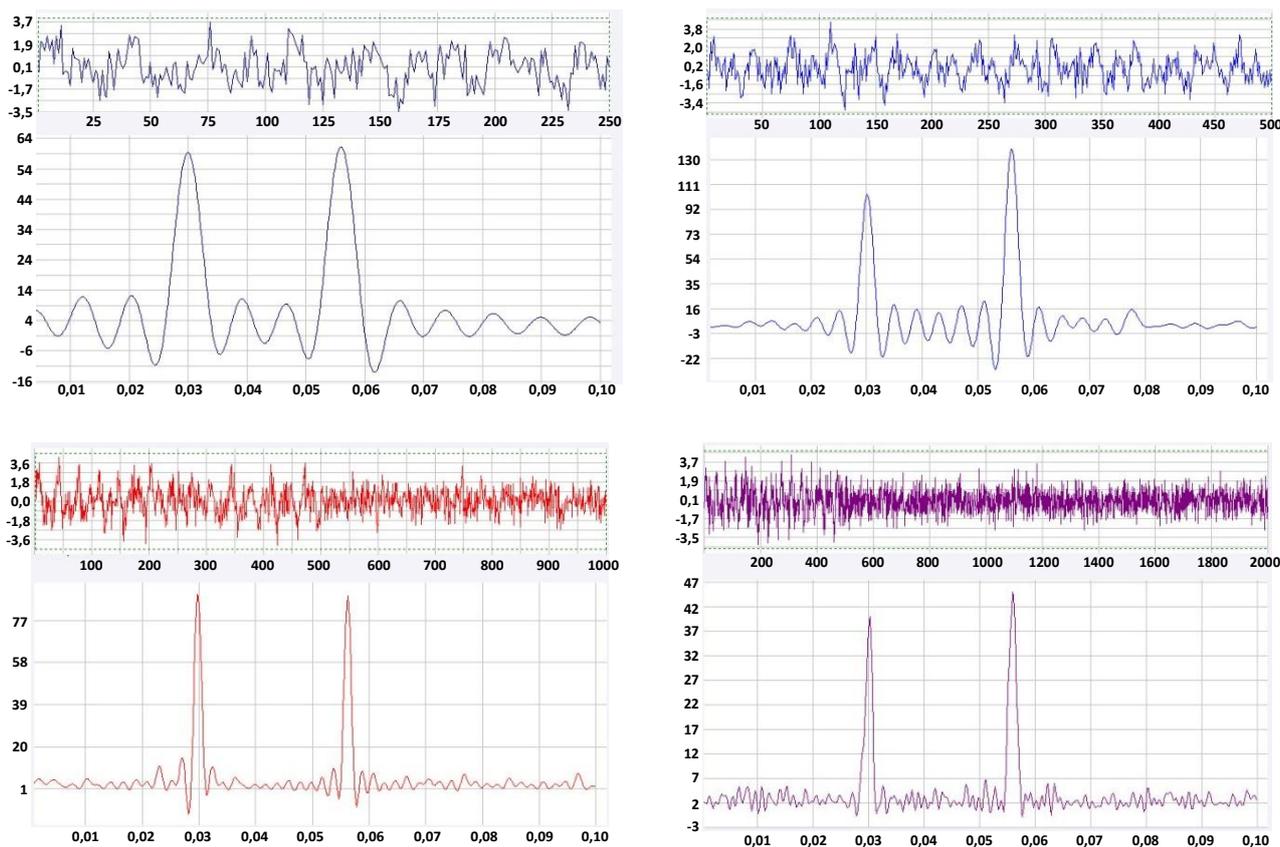


Рис. 7. Анализ влияния количества точек временного ряда на эффективность спектрального анализа.

### *Анализ влияния коэффициента автокорреляции данных ряда на способность выделения гармонического тренда.*

На рисунке 8 показано влияние коэффициента автокорреляции значения ординат временного ряда на вид его спектральной характеристики.

Из графиков видно, что с ростом коэффициента автокорреляции на спектрограмме при малых частотах появляются добавочные пики. При этом чем больше коэффициент автокорреляции, тем ближе пик на спектрограмме к

началу координат и тем он больше. Это вполне соответствует содержательному смыслу автокорреляции, характеризующему тесноту связи ординат временного ряда.

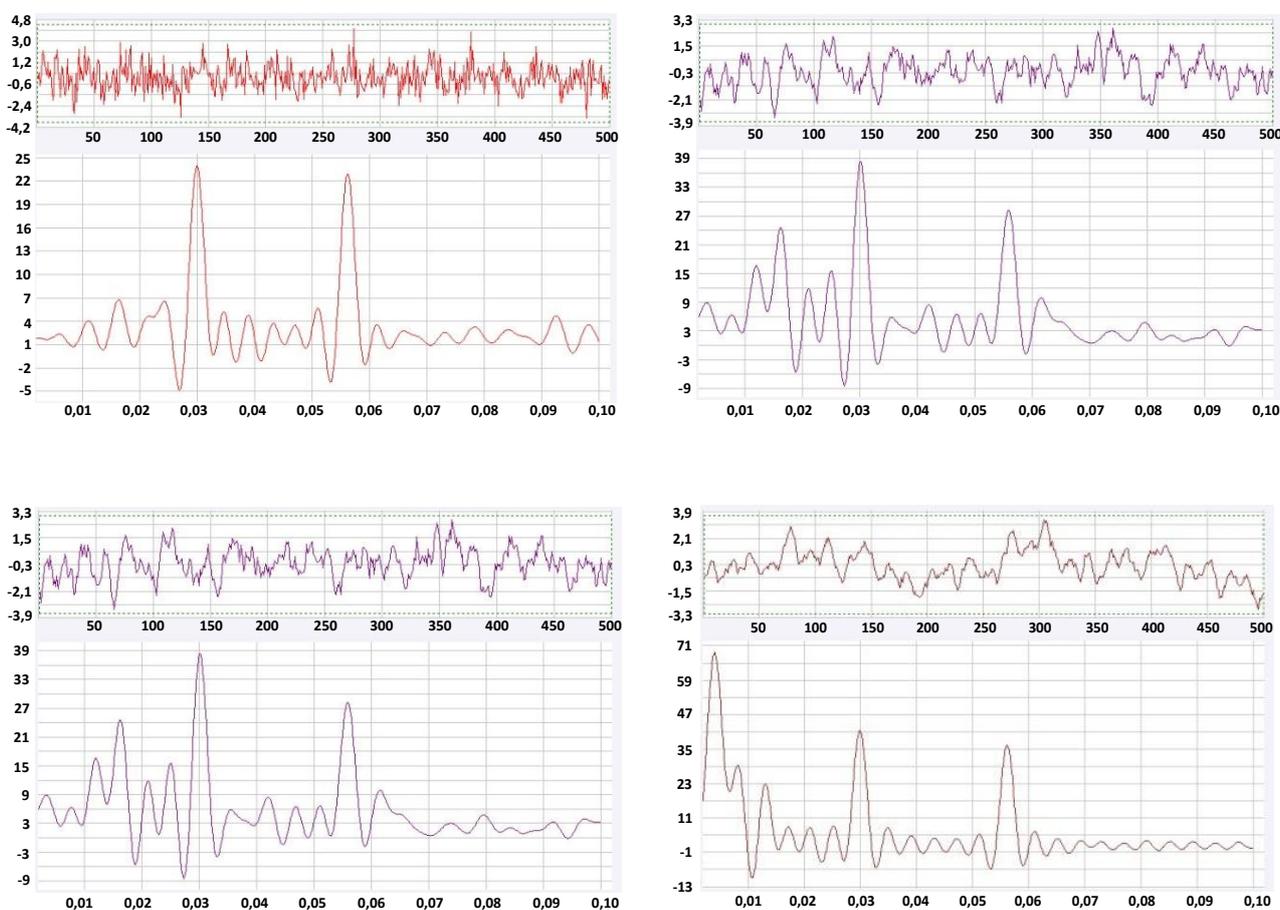


Рис. 8. Анализ влияния коэффициента автокорреляции временного ряда на вид его спектральной характеристики.

Соответственно (слева – направо – вниз)  $R=0$ ,  $R=0.75$ ,  $R=0.90$ ,  $R=0.95$

*Анализ возможности выделения нескольких коротких периодических трендов*

Проанализируем возможность выделения коротких гармонических составляющих в суммарном временном ряду (графики представлены на рисунках 9 - 10).

На рисунке 9 представлен исходный временной ряд с двумя гармоническими детерминированными составляющими различной амплитуды, действующими на половине рассматриваемого временного диапазона и спектрограмма этого ряда, подтверждающая наличие двух гармонических составляющих с заданными частотами.

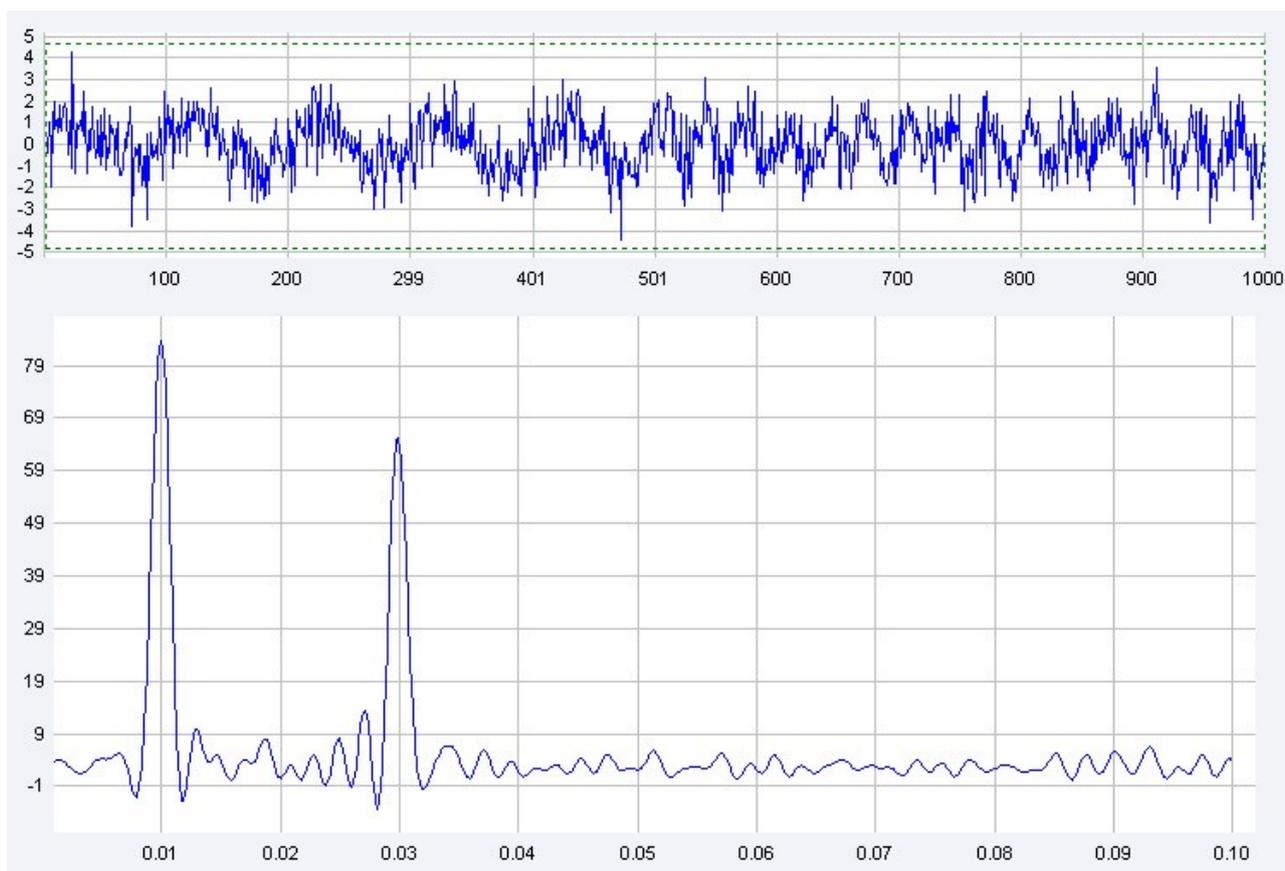


Рис. 9. Вверху – исходный временной ряд с двумя гармоническими детерминированными составляющими различной амплитуды; внизу – спектрограмма ряда.

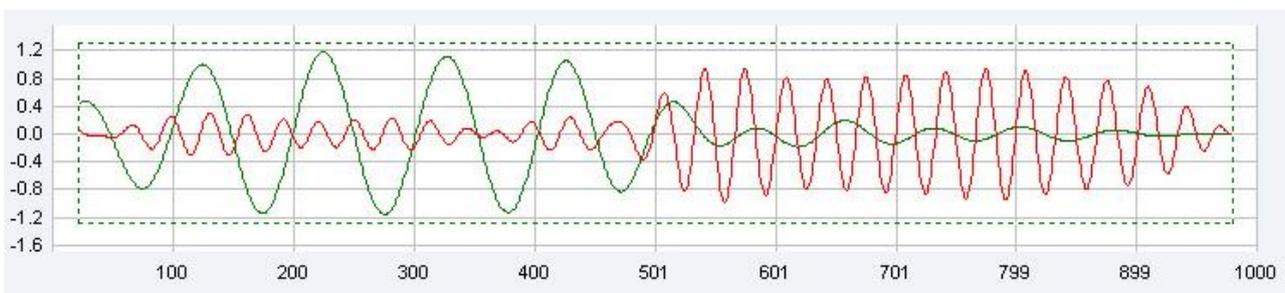


Рис. 10. Выделенные гармонические составляющие из сильно зашумлённого временного ряда в первой и второй его частях.

Из рисунка 10 видно, что восстановленные гармонические составляющие из зашумлённого временного ряда (при СКО шума равном 1), совпадают по частоте, но не совпадают по фазе и несколько не совпадают по амплитуде (низкочастотная детерминированная составляющая имела амплитуду 1 ед., а высокочастотная – 0,75). Кроме того, начало и конец выделенных составляющих несколько искажены, что объясняется неидеальностью используемого цифрового фильтра. Тем не менее, результат выделения по

временному ряду с суммарными значениями ординат ряда вполне пригоден для временной и частотной идентификации регулярных отклонений работоспособности всей системы.

Проанализируем качество восстановления временного ряда с различными импульсными данными (см. рисунки 11 - 13).

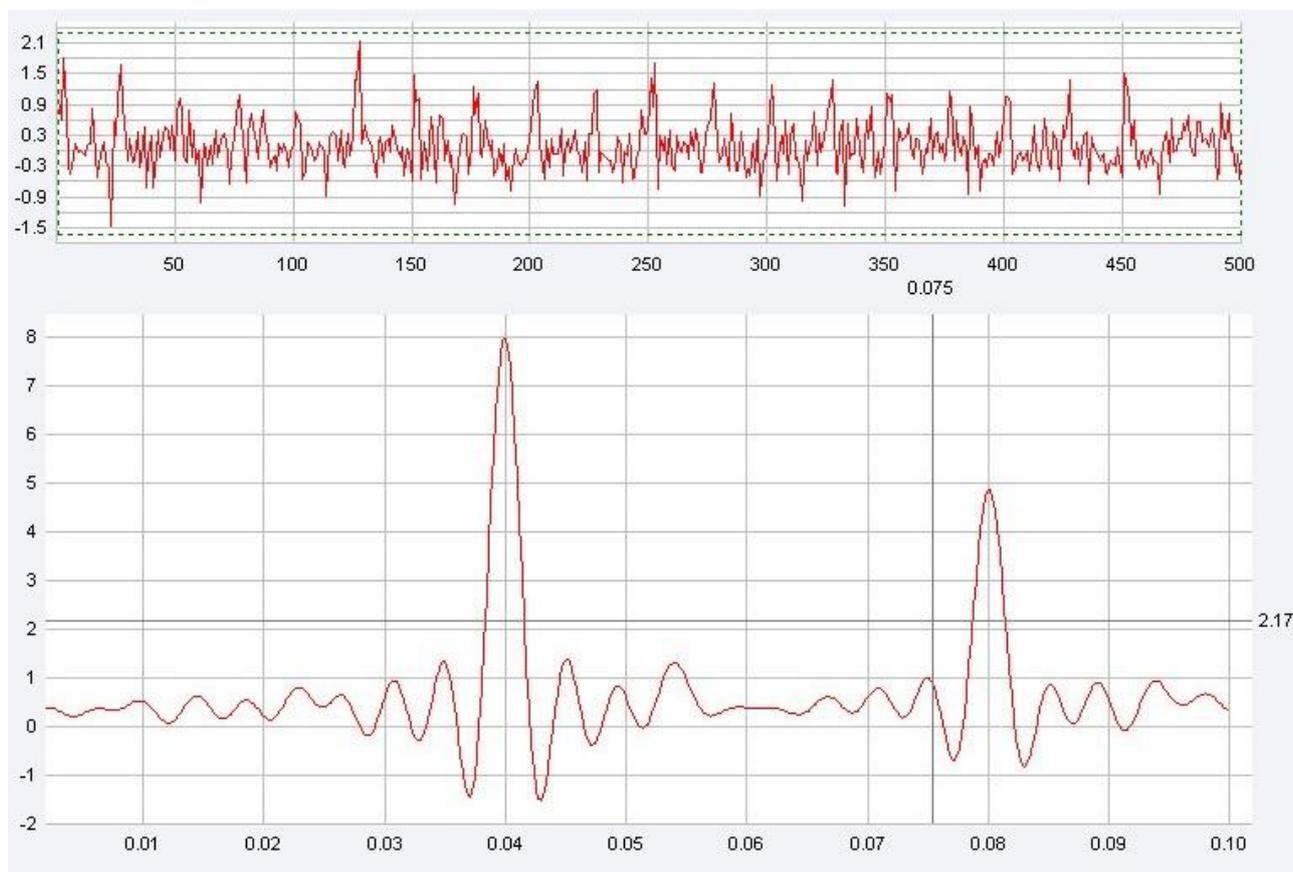


Рис. 11. Зашумлённый (дисперсия случайной составляющей равна 0,15) временной ряд с импульсами малой конечной длительности постоянного периода и его спектрограмма.

В приведённом примере восстановленный ряд усекается на один импульс в начале ряда и в его конце. При большей дисперсии случайной составляющей высокоскоростная составляющая переднего и заднего фронтов импульсов выделяется существенно хуже, что определяется применённым алгоритмом фильтрации. Эта же причина обуславливает периодическое уменьшение амплитуды восстановленных импульсов.

При анализе спектрограммы с импульсами конечной длительности обращает на себя внимание появление на спектрограмме гармоник с кратными частотами, количество которых зависит от уровня случайного шума.

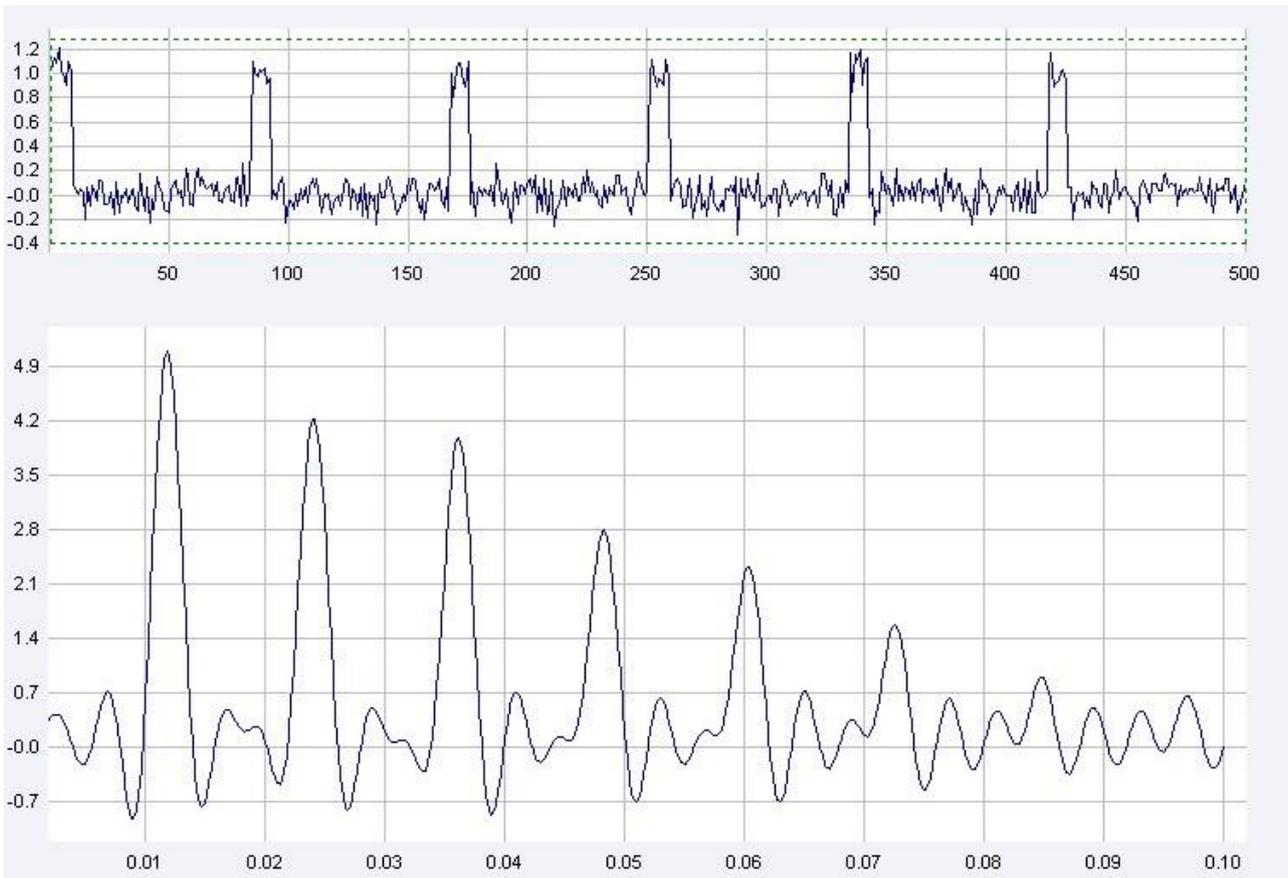


Рис. 12. Мало зашумлённый (дисперсия случайной составляющей равна 0,01) временной ряд с импульсами малой конечной длительности постоянного периода и его спектрограмма.

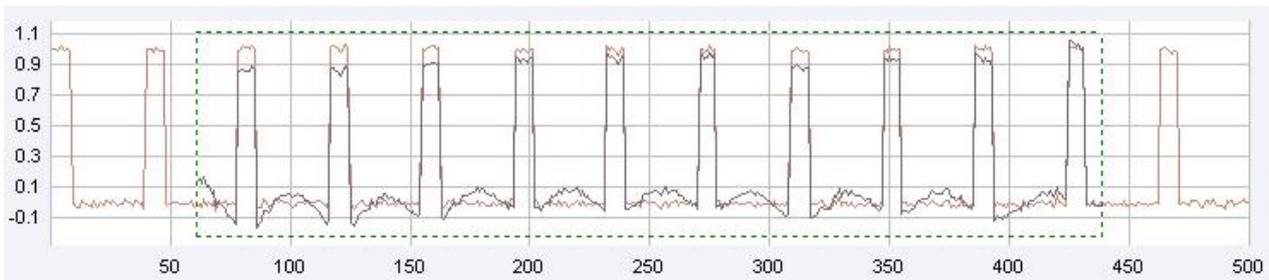


Рис. 13. Исходный временной ряд с прямоугольными импульсами скважностью 0,2 с малой дисперсией случайной составляющей (0,0002) и восстановленный ряд.

Такой вид спектрограммы оказывается характерным для импульсных регулярных составляющих зашумлённых временных рядов и полностью соответствует теоретическому спектру периодической последовательности прямоугольных импульсов, который представляет собой множество гармоник с огибающей вида [10, 11]:

$$S(\omega) = A \frac{\sin(\omega\tau/2)}{\omega T/2},$$

где  $T$  – период импульсной последовательности;

$\tau$  – длительность импульса.

Проведённые исследования показали, что спектральный анализ практически не позволяет надёжно выделять несколько составляющих с прямоугольными импульсами. Для конкретных рекомендаций по анализу составляющих с прямоугольными импульсами необходимы дополнительные исследования.

Таким образом, спектральный анализ позволяет выделять импульсные составляющие в суммарном зашумлённом временном ряду, но цифровой фильтрацией их удаётся восстанавливать только при малой случайной составляющей. Кроме того, во всем объёме ряда не удаётся восстанавливать последовательности прямоугольных импульсов на краях этой последовательности.

Из приведённых результатов этого этапа анализа возможностей спектрального анализа для выделения детерминированных составляющих диагностического ряда видно, что с помощью рассматриваемого инструмента исследования удаётся достаточно надёжно выделять синусоидальные составляющие даже при большом уровне шумов и менее надёжно - импульсные (импульсы конечной длительности) составляющие, которые достаточно хорошо восстанавливаются при малом уровне шумов. Это является важным выводом для содержательного прогнозирования надёжности по реальным исходным данным.

*Анализ возможности выделения гармонического тренда при экспоненциальной случайной составляющей*

Рассмотрим представленный на рисунке 14 временной ряд, который содержит случайную составляющую, подчиняющуюся экспоненциальному закону распределения, широко распространённому в теории надёжности. В этом случае также достаточно чётко выделяются заложенные в процесс

гармонические составляющие (в данном случае две). Можно допустить, что такой закон распределения будет не часто появляться при интегрированном временном ряде. Это обосновывается центральной предельной теоремой математической статистики, утверждающей, что при большем числе случайных с различными законами распределения воздействий на систему распределение выходной величины будет близко к нормальному закону.

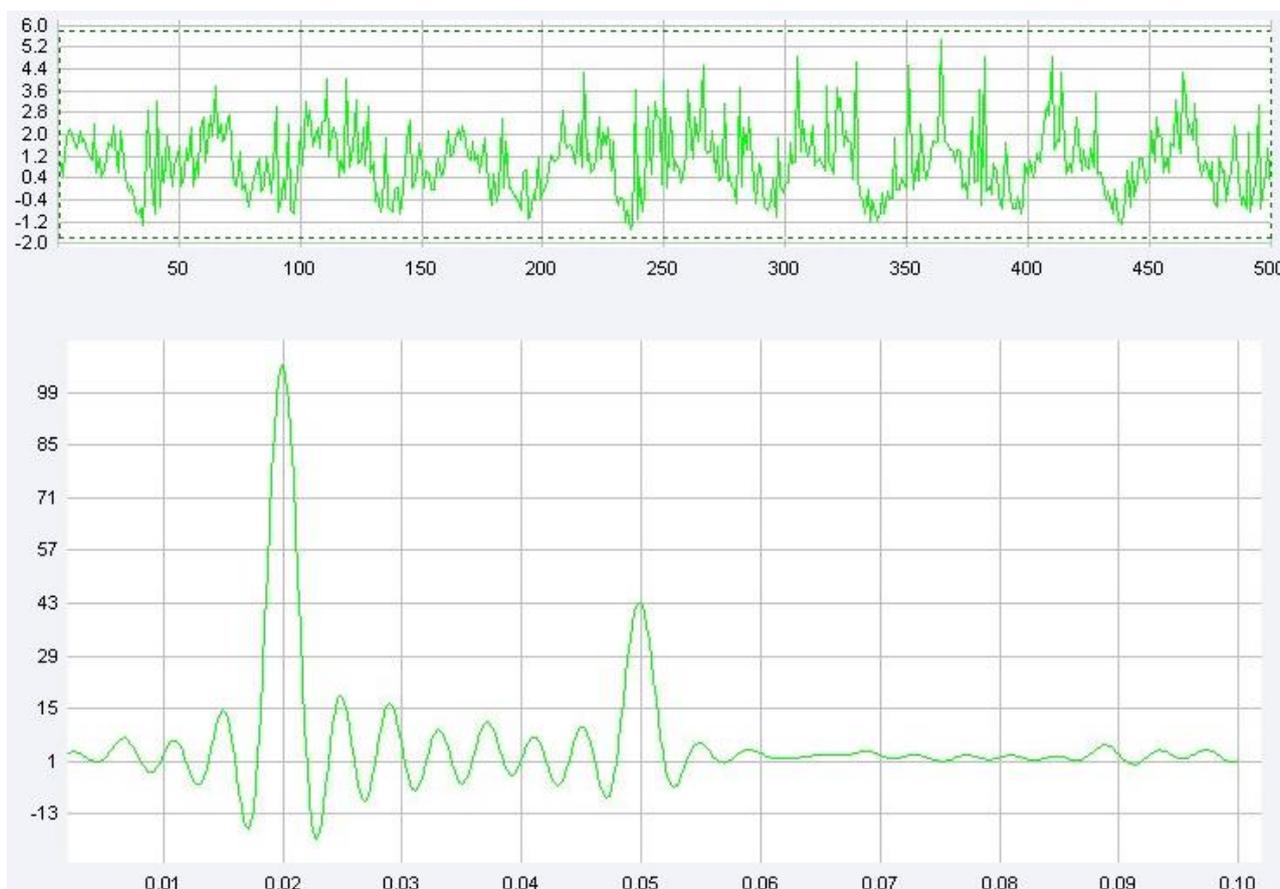


Рис. 14. Анализ временного ряда со случайной составляющей, подчиняющейся экспоненциальному закону распределения.

### Рекомендации по порядку проведения анализа

Для повышения качества анализа можно рекомендовать сначала в исследуемом зашумлённом ряду удалить (отфильтровать) с помощью высокочастотного фильтра низкочастотные составляющие (которые обычно с высокой вероятностью присущи реальным процессам), при этом останется высокочастотная (шумовая) составляющая. По ней определить свойства (закон распределения и его параметры) истинно случайной величины, которые влияют на доверительный интервал прогноза, затем удалить в рассматриваемом

исходном ряду высокочастотную случайную составляющую. Останутся низкочастотные составляющие, и в этом отфильтрованном ряду легче (точнее) выделить все гармонические детерминированные составляющие и тренды. Содержательным анализом выявить основные причины и устранить их, если это возможно.

### Математическое описание выделяемых трендов

Математическое описание выделяемых трендов необходимо при их удалении из временного ряда. Очевидно, что гармоническая синусоидальная и линейная составляющие будут выражаться в общем виде традиционными зависимостями, приведенными ниже.

Математическая временная модель импульса конечной длительности  $x(t)$ , симметричного относительно вертикальной оси системы координат, может быть записана с использованием функции включения  $\sigma(t)$ :

$$x(t) = A \left[ \sigma \left( t + \frac{\tau}{2} \right) - \sigma \left( t - \frac{\tau}{2} \right) \right],$$

где  $\tau$  – длительность импульса.

Описание последовательности одинаковых импульсов конечной длительности можно представить в виде

$$x(t) = A \left[ \sigma \left( (t + nT) + \frac{\tau}{2} \right) - \sigma \left( (t + nT) - \frac{\tau}{2} \right) \right],$$

где  $T$  – период импульсной последовательности.

Можно также представить совокупность импульсов их суммой, т.к. все импульсы сдвинуты по времени один относительно другого.

Если импульс конечной длительности начинается в нулевой момент времени, то модели одного импульса и их последовательности можно записать как  $x(t) = A[\sigma(t + \tau) - \sigma(t)]$  и соответственно  $x(t) = A[\sigma(t + nT + \tau) - \sigma(t + nT)]$

Во всех формулах для последовательности импульсов  $n=0, 1, 2, \dots$

В итоге описание выделяемых гармонических и линейных трендов будет выглядеть следующим образом:

$$R_1(t_j) = \sum_k^{k_{zapm}} A_k \sin(w_k t_j + \varphi_k),$$

$$R_2(t_j) = \sum_i^{k_{лmp}} (a_i t_j + b_i),$$

$$R_3^{zap1} = A_{umn} \left[ \sigma \left( t + nT + \frac{\tau}{2} \right) - \sigma \left( t + nT - \frac{\tau}{2} \right) \right], n = 1, 2, \dots,$$

$$R_3^{zap2} = A_{umn} [\sigma(t + nT + \tau) - \sigma(t + nT)], n = 1, 2, \dots,$$

$$j = \overline{1, N},$$

где  $k_{zapm}$  – количество выделенных гармонических составляющих;

$k_{лmp}$  – количество выделенных непрерывных линейных трендов;

$T$  – период прямоугольных импульсов.

В первом выражении стоит модель  $\sin$  составляющих, во втором – непрерывных линейных трендов.

В этих выражениях для повышения точности определения амплитуд и фаз выделенных гармонических составляющих необходимо скорректировать  $A_i$  и  $\varphi_i$ .

Во втором выражении стоит выражение непрерывных линейных трендов, в которых следует скорректировать коэффициенты  $a_j$  и  $b_j$ .

В выражении  $R_3$  необходимо корректировать  $T$ . Необходимость корректировки вызвана некоторым искажением начальных и конечных участков трендов при их восстановлении с использованием частотных фильтров. На недостаточную точность их выделения ранее было обращено внимание. Это вызвано использованием только широко распространённого амплитудного спектрального анализа без учета фазовой составляющей спектрального анализа.

Упомянутое уточнение осуществляется минимизацией суммы квадратичных мер близости расчётных и экспериментальных после фильтрования высокочастотных случайных составляющих. При этом желательно сместить внутрь ряда начало и конец временного интервала примерно на 10% длины анализируемого ряда и рассматривать

$j = 1 + \overline{[0.1N], [0.9N]}$ . Это необходимо для компенсации погрешностей восстановления временного ряда, вызванных неидеальностью фильтров. Квадратными скобками обозначены результаты целочисленной операции умножения, т.е. выделение целой части результата.

Так как для прогноза рассматриваются в основном выделенные тренды на протяжении всего интервала времени формирования диагностического ряда, то некоторое сокращение длительности восстановленных детерминированных составляющих не окажет влияние на прогноз, зато обеспечивается более точный прогноз на следующий интервал времени.

Алгоритм коррекции параметров выделенных составляющих можно представить следующим образом:

$$R_1 = \sum_{j=1+\overline{[0.1N]}}^{0.9N} (R_1(t_j) - Y_{нч}(t_j))^2$$

$$R_2 = \sum_{j=1+\overline{[0.1N]}}^{0.9N} (R_2(t_j) - Y_{нч}(t_j))^2$$

$$R_3^{eap1} = \sum_{j=1+\overline{[0.1N]}}^{0.9N} \left( A_{umн} \left[ \sigma \left( t + jT + \frac{\tau}{2} \right) - \sigma \left( t + jT - \frac{\tau}{2} \right) \right] - Y_{нч}(t_j) \right)^2$$

$$R_3^{eap2} = \sum_{j=1+\overline{[0.1N]}}^{0.9N} \left( A_{umн} [\sigma(t + jT + \tau) - \sigma(t + jT)] - Y_{нч}(t_j) \right)^2$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \rightarrow \min_{A_j, \varphi_j, a_j, b_j, T}.$$

В выражениях  $Y_{нч}$  – выделенные из временного ряда низкочастотные составляющие после фильтрации высокочастотных.

Уточнённые модели могут быть использованы для расчёта прогноза работоспособности системы. Закон распределения отфильтрованной высокочастотной составляющей даёт возможность определить доверительный интервал прогноза на заданный диапазон времени.

### Краткосрочный прогноз работоспособности системы

Краткосрочный прогноз работоспособности радиотехнической системы можно сделать следующими способами.

Первый способ – используя полученный временной диагностический ряд полностью и построив модель этого ряда (например, с помощью нейронных сетей), использовать эту модель для расчёта значений ординат ряда (т.е. анализируемых характеристик надёжности системы) в следующие моменты времени, полагая, что причинно-следственные отношения сохранятся, как и в период времени построения модели.

Второй способ – используя диагностический ряд полностью и отфильтровав в нем высокочастотные составляющие (шумы) и построив модель этого ряда (например, с помощью нейронных сетей), использовать эту модель для расчёта значений ординат ряда (т.е. анализируемых характеристик надёжности системы) в следующие моменты времени полагая, что причинно-следственные отношения сохранятся как и в период времени построения модели, а отфильтрованную высокочастотную составляющую использовать для оценки возможного доверительного интервала прогноза.

Третий способ – используя диагностический ряд выделить в нём все регулярные детерминированные составляющие и провести их идентификацию, т.е. найти соответствующие причины появления этих детерминированных составляющих и устранить их (причём неоднократно проверять эффективность идентификации причин и их устранение) по не устранённым детерминированным составляющим сделать прогноз, а отфильтрованную высокочастотную составляющую использовать для оценки возможного доверительного интервала прогноза.

Одним из недостатков первого способа является полное игнорирование чисто случайной составляющей, последовательность данных к которой является непредсказуемой в силу её случайности (по определению случайной величины).

Недостатком первых двух способов является допущение, что причинно-следственные отношения нестационарности диагностического временного ряда сохранятся в будущем на период времени прогноза. Нестабильность этих отношений может быть обусловлена старением отдельных составных частей

системы, проводимым ремонтом и заменой отдельных модулей и элементов, обслуживанием системы персоналом, изменением климатических условий эксплуатации системы и др. Поэтому модель совокупности реальных отклонений в функционировании системы не будет сохраняться, и нужно на каждом этапе заново проводить обучение и все другие этапы построения модели, что может не обеспечить её необходимую точность в приемлемое время обучения во время эксплуатации системы.

Достоинством третьего способа является выявление постоянных и периодических (в том числе и вследствие случайных причин) детерминированных составляющих, действующих в течение неопределённого диапазона времени, которые можно идентифицировать, связав по содержательной сущности с конкретным состоянием с составными частями системы и в случае возможности оперативно устранить эти причины. Поэтому ряд и называется диагностическим. Эта возможность обновления системы обусловит её более стабильную работу. А лишь только затем провести расчёт прогнозируемого значения надёжности системы, используя для этого расчёта модели выявленных детерминированных составляющих. В таком случае в результате прогноза имеем не только прогноз, но и диагностику наиболее критических мест, идентифицированных (блоков, узлов и пр.) в системе как причины имеющихся отказов. Как и во втором способе, используются доверительные интервалы предельной надёжности, определённые по случайной составляющей временного диагностического ряда.

### **Заключение**

При прогнозировании следует учитывать только те выделенные линейные и гармонические тренды, которые не заканчиваются к концу анализируемого диагностического ряда, продолжают и в период прогноза. При этом допускаем, что такие детерминированные тренды сохранятся и на время прогноза.

Таким образом, очевидно, что для прогноза необходимо использовать несколько составляющих.

В первую очередь к ним относятся детерминированные тренды.

Во-первых, выделенные гармонические синусоидальные тренды, не закончившиеся к концу временного диагностического ряда. Их может быть несколько, отличающихся амплитудой, частотой, начальным фазовым сдвигом и вызванных различными причинами.

Во-вторых, это могут быть линейные непрерывные на всем временном ряду тренды, которых также может быть несколько со своими углами наклона. Кроме этого, в эту группу следует отнести и линейные тренды, начавшиеся в текущем временном ряду и не закончившиеся к его концу.

В-третьих, это могут быть последовательности прямоугольных импульсов, которые тоже ещё не закончились к концу ряда. Поскольку гарантированно их выделить отдельно достаточно трудно, то на данном этапе будем полагать, что такой ряд присутствует один.

Могут быть даже выявлены периодически повторяющиеся детерминированные последовательности в разных диагностических временных рядах, причём удалось оценить их период повторения. Если такой ряд, хотя его в данный момент подготовки к прогнозу нет, но можно рассчитать, что на прогнозируемый диапазон времени он будет существовать, то его тоже нужно включить в расчёт детерминированной составляющей прогноза.

Общее, что объединяет эти составляющие, это длительность существования, возможно даже в нескольких подряд рядах. Поэтому высока вероятность того, что они сохранятся и на сравнительно короткий период времени прогноза.

Прогнозируемое значение детерминированных составляющих легко находится по моделям соответствующих составляющих расчётным путём в необходимый момент времени. Очевидно, что если период гармонической составляющей больше диапазона прогноза, то нужно найти максимальное прогнозируемое значение анализируемой величины. Оно определит гарантированную верхнюю границу прогноза. Общее прогнозируемое значение получится суммированием прогнозов всех детерминированных составляющих.

Кроме того, следует отдельно учесть чисто случайную составляющую анализируемого процесса изменения надёжности работы системы, информация о которой получается при выделении высокочастотной составляющей в диагностическом временном ряду. С высокой вероятностью вследствие справедливости центральной предельной теоремы математической статистики можно утверждать, что закон распределения этой случайной составляющей будет близок нормальному закону. А так как временной ряд центрирован, то математическое ожидание этой случайной составляющей будет равно нулю, поэтому единственной характеристикой этой составляющей будет дисперсия или СКО. Зная эту характеристику, можно легко найти доверительный интервал прогноза [2 - 5].

### Литература

1. Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А., Кирмель А.С. Методика оценки функциональных характеристик систем радиомониторинга при ограниченных данных о параметрах надёжности // Труды МАИ. 2019. №108. URL: <https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-16>.
2. Васильков Ю.В., Иняц Н. Статистические методы управления предприятием: доступно всем. М.: РИА Стандарты и качество, 2008. 280 с.
3. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. Под ред. В.Г. Горского. М.: Мир, 1973. 958 с.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 540 с.
5. Васильков Ю.В., Боровков А.В., Фуфин С.Ю. QStat methods – Статистические методы в управлении качеством: Электронный учебник по статметодам. – Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ. № 2008610646. 2008. 500 мб.
6. Половко А.М. Основы теории надёжности / А.М. Половко, С.В. Гуров – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.

7. В.А. Лукас. Теория автоматического управления. – М.: Недра, 1990.
8. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы // Изд. 4, испр. и доп.: URSS. 2016 – 528 с.
9. Васильков Ю.В. Анализ методов выделения тренда / Васильков Ю.В., Камакин А.Н. Сергеев И.А., Фролов П.А. // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 11. С. 499-504.
10. Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др.; Под ред. Е.М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. — 480 с.
11. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. / А. А. Воронов, Д. П. Ким, В. М. Лохин и др.; Под ред. А. А. Воронова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 504 с.

**Для цитирования:**

Васильков Ю.В., Тимошенко А.В., Советов В.А. Интегральная оценка точности краткосрочного прогноза надежности радиотехнических систем. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №2. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/7/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.2.7